

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORULARIN DIŞ YÜZEYİNDEKİ HAREKETLİ SIVI FİLMİNDEN OLAN ISI VE
KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

CENK ONAN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. DERYA BURCU ÖZKAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BORULARIN DIŞ YÜZEYİNDEKİ HAREKETLİ SIVI FİLMİNDEN OLAN ISI VE
KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

Cenk ONAN tarafından hazırlanan tez çalışması 13.06.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Derya Burcu ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Derya Burcu ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Galip TEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Korhan BİNARK
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN
Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasında, zorlanmış taşınım koşullarında hareketli sıvı filminden havaya gerçekleşen ısı ve kütle transferi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir ve matematiksel model oluşturulmuştur.

Doktora tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştirileri ve önerileri ile çalışmalarına büyük katkısı bulunan, yapılan ilk deneylere bizzat yerinde katılıp fikirlerini paylaşan, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Derya B. ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm tecrübelerini ve deneyimlerini paylaşan, tez çalışması sırasında olumlu eleştirileri ve önerileri ile tezimde büyük katkısı bulunan, değerli hocam Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE'ye, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Galip TEMİR'e ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. A. Korhan BİNARK'a çok teşekkür ederim. Doktora tez jürimde yer alan ve katkılarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN'a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında maddi manevi desteğini ve deney tesisatının kurulumunda, deneylerin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Serkan ERDEM'e çok teşekkür ederim. Desteklerini esirgemeyen, verdiği bilgiler ile bu çalışmaya katkılarından dolayı, başta hocam Sayın Doç. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ ve tüm çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Teknik desteklerini esirgemeyen, her türlü problemimde yardımcı olan başta değerli hocalarım olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca beni yetiştiren, her türlü konuda destekleyen aileme şükranlarımı sunarım.

Haziran, 2013

Cenk ONAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	18
1.3 Hipotez.....	18
BÖLÜM 2	
TEMEL KAVRAMLAR.....	19
2.1 Akış Tiplerinin Sınıflandırılması	22
2.2 Özgül Nem.....	23
2.3 Bağıl Nem	26
BÖLÜM 3	
MATEMATİKSEL MODEL	27
3.1 Besleme Suyu Akışı Kapalı İken Yapılan Deneylerde Isı Taşınım Katsayısı ve Nu Değerlerinin Belirlenmesi.....	27
3.2 Düşen Su Film Akışı Olması Halinde Isı Taşınım Katsayısı, Taşınım Kütlesi Geçiş Katsayısının ve Nu, Sh Değerlerinin Belirlenmesi.....	28

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
4.1 Deney Tesisatı ve Test Hücresi	33
4.1.1 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri ve Ekipmanları	33
4.1.1.1 Higrometre	34
4.1.1.2 Termoelemanlar	35
4.1.1.3 Anemometre	36
4.1.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanları	37
4.1.2.1 Tesisat Ekipmanları	37
4.1.2.2 Depolu Sıcak Su Isıtıcısı	37
4.1.2.3 Test Hücresi	38
4.1.2.4 PID Kontrol Ünitesi	39
4.1.2.5 Veri Kaydedici	39
4.1.2.6 Debimetre	40
4.1.2.7 Boru İçi Isıtıcı	41
4.1.2.8 Görüntüleme Cihazı	43
4.1.2.9 Frekans Ayarlayıcı	44
4.2 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Metodu	45
4.3 Termoelemanların Yerleştirilmesi	46
4.3.1 Termoelemanların Kalibrasyonu	47
4.4 Deneylerin Yapılışı	48
4.5 Deney Planı	50
4.6 Yivli Borunun Alanının Hesaplanması	51
4.7 Sayısal Görüntü İşleme	52
4.7.1 Kullanılan Yöntemler	54
4.7.1.1 Eşik Belirleme	55
4.7.1.2 Keskinlik	55
4.7.2 Görüntü İşleme	55
4.7.3 Sistem Tasarımı	57
4.7.4 Fotoğrafların Matlab Programında Analizi ve Ön Hazırlık Evresi	58
4.7.4.1 Görüntü İşleme Sonuçları	59

BÖLÜM 5

BULGULAR	63
5.1 Yivli Boru ve Referans Düz Boru için Düşen Film Tipi Akışı Olmadan Zorlanmış Taşınım Koşullarında Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular	63
5.2 Yivli Boru ve Referans Düz Boru için Düşen Film Tipi Akışı Olması Halinde Zorlanmış Taşınım Koşullarında Yapılan Deneylerin Sonuçları	66
5.3 Referans Düz Boru ile Yivli Boruda Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması	73
5.4 Colburn Eşitliği ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması ve Akış Tipi Grafiği	76
5.5 Eş Zamanlı Kütle ve Isı Transferinin Gerçekleştiği Farklı Zorlanmış Taşınım Koşulları için Nu Korelasyonu	77

5.6	Eş Zamanlı Kütle ve Isı Transferi Gerçekleşen Durumlarda Genel Nu ve Sh Korelasyonu	81
5.7	Düşen Su Filmi Akışı için h_{ff} (W/m ² K) Taşınım Katsayılarının ve Nu değerlerinin Belirlenmesi	83
5.8	Termodinamiğin Birinci Kanununun Uygulanması	83
BÖLÜM 6		
SAYISAL ÇALIŞMALAR.....		86
6.1	Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri.....	86
6.1.1	Sayısal Çözüm Yöntemleri	86
6.1.1.1	Ayrı Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)	86
6.1.1.2	Bir Arada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver).....	87
6.1.1.3	Lineerleştirme Yöntemleri	87
6.1.1.4	Örtülü Yöntem (Implicit Formulation)	87
6.1.1.5	Açık Yöntem (Explicit Formulation).....	88
6.1.2	İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi	88
6.1.3	Basınç-Hız Çifti İçin Simple Metodu.....	89
6.1.4	Artık Değer (Residual).....	89
6.1.5	Yakınsama ve Kararlılık	90
6.1.6	Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma.....	90
6.2	Çözüm Ağı Kontrolü	93
6.3	Modelin Çizimi ve Çözüm Ağının Oluşturulması	95
6.4	Yivli ve Referans Düz Borunun Sayısal Çözüm Sonuçları	97
BÖLÜM 7		
BELİRSİZLİK ANALİZİ		104
7.1	Belirsizlik Analizi Yöntemi	105
7.2	Belirsizliklerin Tespiti	105
BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		112
8.1	Sonuçlar	112
8.2	Öneriler	114
KAYNAKLAR		116
EK-A		
MATLAB PROGRAMINDA KULLANILAN YAZILIMIN KODU		123
EK-B		
KALİBRASYON EĞRİLERİ		131

EK-C

DENEY TESİSATININ TEKNİK DETAYLARI	136
ÖZGEÇMİŞ	139

SİMGE LİSTESİ

A	Alan (m^2)
A_c	Yüzey alanı (m^2)
Ar	Archimedes sayısı (-)
A_v	Birim hacimdeki temas alanı (m^2)
b	Yiv kökleri arası genişlik (mm)
c	Yiv yan yüzeyinin uzunluğu (mm)
c_p	Özgöl ısınma ısısı (kJ/kg.K)
D	Çap (m)
D_{AB}	İkili kütle difüzyon katsayısı (m^2/s)
e	Yiv yüksekliği (mm)
G	Minimum kesitteki akışkanın kütleli akısı ($kg/s.m^2$)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
Ga	Modifiye edilmiş Galileo sayısı (-)
h	Isı taşıma katsayısı ($W/m^2.K$)
h_{fg}	Buharlaştırma gizli ısısı (kJ/kg)
h_m	Taşıma ile kütle geçiş katsayısı (m/s)
k	Isı iletim katsayısı ($W/m.K$)
Le	Lewis sayısı (-)
L_{kar}	Karakteristik uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
M	Moleküler kütle (kg/kmol)
n	Kütle geçiş akısı ($kg/m^2.s$)
N	Yiv sayısı (adet)
Nu	Nusselt sayısı (-)
p	Hatve (mm)
P	Kısmi basınç (Pa), Çevre (m)
P^*	Tahmini basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı (-)
Q	Isı geçişi (W)
R	Gaz sabiti (kJ/kg.K)
Re	Reynolds sayısı (-)
Re_a	Havanın Reynolds sayısı (-)
Re_s	Suyun Reynolds sayısı (-)

$R^\emptyset$	Boyutsuz artık değeri (-)
R_u	Üniversal gaz sabiti (kJ/kmol.K)
S	Boru aralığı (m)
Sc	Schmidt sayısı (-)
Sh	Sherwood sayısı (-)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	Yivin uç genişliği (mm)
u	x yönündeki hız bileşeni (m/s)
u^*	x yönündeki tahmini hız (m/s)
V	Hacim (m^3), Voltaj (V)
v	Hız (m/s), y yönündeki hız bileşeni (m/s)
v^*	y yönündeki tahmini hız (m/s)
w	Boru et kalınlığı (mm), Hata oranı (%), z yönündeki hız bileşeni (m/s)
w^*	z yönündeki tahmini hız (m/s)

Alt indisler

∞	Ortam
a	Hava
A, B	İkili karışımda bileşenler
b	Buharlaşıma
bes	Besleme
buh	Buharlaşan
c	Taşıyım
d	Doyma
f	Film
ff	Düşen su filmi
g	Genel
h	Elektrikli ısıtıcı
i	Giriş
o	Çıkış
s	Su
t	Toplam
th	Test hücresi
y	Yüzey
$\emptyset$	Su buharı

Yunan harfleri

μ	Dinamik vizkozite (N.s/m ²)
γ	Apeks açısı ($^{\circ}$)
α	Isı yayılma katsayısı (m ² /s)
β	Heliks açısı ($^{\circ}$)
Γ	Birim boydan düşen su filminin kütleli debisi (kg/m.s)
δ	Film kalınlığı (m)
ΔS	Yer değişim faktörü
θ	Açı ($^{\circ}$)
$\emptyset$	Kinematik vizkozite (m ² /s)

λ	Dalgaboyu (m)
ρ	Kütle yoğunluğu (kg/m ³)
σ	Yüzey gerilimi (N/m)
φ	Bağıl nem (%)
ω	Mutlak nem (grSB/ kgKH)

KISALTMA LİSTESİ

BK	Burgulu kare yiv formu
BT	Burgulu trapez yiv formu
BÜ	Burgulu üçgen yiv formu
BY	Burgulu yuvarlak yiv formu
EK	Eksenel kare yiv formu
ET	Eksenel trapez yiv formu
EÜ	Eksenel üçgen yiv formu
EV	Pozlama değeri
EY	Eksenel yuvarlak yiv formu
fpi	İnç başına kanat sayısı
KH	Kuru hava
PID	Oransal integral türevsel denetleyici
RMS	Ortalama karekök hatası
SB	Su buharı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1	Kütle transfer akısı değerlerinin değişimi [67] 15
Şekil 2. 1	Düşen film akış tipleri a) damlacıklı akış b) jet akış c) perde tipi akış d) Taylor dengesizliği illüstrasyonu [3] 19
Şekil 2. 2	Film akışının şematik gösterimi ve kuru bölge oluşumu [72]..... 20
Şekil 2. 3	Silindir üzerinden çapraz akışın sınıflandırılması [73] 21
Şekil 2. 4	Düşen film için akış haritası [19] 23
Şekil 3. 1	Burgulu trapez yivli borunun özellikleri 31
Şekil 4. 1	Deney sisteminin şematik gösterimi 34
Şekil 4. 2	Higrometrelerin gösterge paneli ve probu 35
Şekil 4. 3	Deney tesisatında kullanılan higrometrelerin çalışma prensibi..... 35
Şekil 4. 4	Deney tesisatında kullanılan termoelemanların bağlantısı..... 36
Şekil 4. 5	Deney tesisatında kullanılan anemometreler 36
Şekil 4. 6	Deney tesisatında kullanılan anemometrelerin kullanım şeması 37
Şekil 4. 7	Depolu su ısıtıcısının şematik resmi ve ekipmanları 38
Şekil 4. 8	Besleyici boru ünitesi ve düşen film tipi akış 39
Şekil 4. 9	Kontrol ünitesinin bilgilendirme ekranı 39
Şekil 4. 10	Veri kaydedici ile verilerin anlık olarak bilgisayardan izlenmesi 40
Şekil 4. 11	Besleme suyu debisini belirlemek için kullanılan elektromanyetik debimetre..... 41
Şekil 4. 12	Boru içi özel ısıtıcının boru içerisine montajı 42
Şekil 4. 13	Yivli boru içi ısıtıcısının termal kamera ile görüntülenmesi ve sıcaklık değişim grafiği 42
Şekil 4. 14	Referans düz boru içi ısıtıcısının termal kamera ile görüntülenmesi ve sıcaklık değişim grafiği..... 43
Şekil 4. 15	Görüntüleme cihazı ile akışın görüntülenmesi..... 44
Şekil 4. 16	Frekans ayarlayıcının, fanın elektrik motoruna bağlantı şeması ve güç besleme bağlantıları 45
Şekil 4. 17	Deney tesisatı 45
Şekil 4. 18	Deney setindeki termoelemanların dizilim şeması 47
Şekil 4. 19	Yazılım içerisindeki kalibrasyon şeması..... 47
Şekil 4. 20	Isıtıcı kapalı konumda iken, sabit yüzey sıcaklığı 20.6 °C ($\pm$ 0.1 °C sapma ile)..... 48
Şekil 4. 21	Voltaj değerlerinin zorlanmış taşınım koşullarında ayarlanması 49

Şekil 4. 22	Yüzey sıcaklığının sabit değerde tutulması için elektrikli ısıtıcının ayarlanması (65V).....	49
Şekil 4. 23	Yüzey sıcaklığının sabit değerde tutulması için elektrikli ısıtıcının ayarlanması (100V).....	50
Şekil 4. 24	Yivli borunun alanının hesaplanması	51
Şekil 4. 25	Bilgisayarda 3 boyutlu modellenen yivli borunun görünümü.....	52
Şekil 4. 26	Sayısallaştırılmış resim [81]	56
Şekil 4. 27	Görüntü işleme genel akım şeması [78].....	56
Şekil 4. 28	Düşen film akışının görüntülenmesi.....	57
Şekil 4. 29	Matlab “Görüntü aracı (Im Tool)” çalışma ekranı	58
Şekil 4. 30	Matlab programında görüntü işleme araçlarının kullanımı	59
Şekil 4. 31	Burgulu trapez yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	59
Şekil 4. 32	Burgulu yuvarlak yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	59
Şekil 4. 33	Burgulu üçgen yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	60
Şekil 4. 34	Burgulu kare yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi.....	60
Şekil 4. 35	Eksenel kare yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi.....	60
Şekil 4. 36	Eksenel trapez yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	60
Şekil 4. 37	Eksenel yuvarlak yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	60
Şekil 4. 38	Eksenel üçgen yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi	60
Şekil 4. 39	Dört farklı geometrili burgulu ve eksenel yivli olmak üzere toplam 8 adet borunun ıslak yüzey alanı sonuçları	62
Şekil 5. 1	Yivli boruda zorlanmış taşınım koşullarında h değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	64
Şekil 5. 2	Yivli boruda zorlanmış taşınım koşullarında Nu değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	64
Şekil 5. 3	Referans düz boruda zorlanmış taşınım koşullarında h değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	65
Şekil 5. 4	Referans düz boruda zorlanmış taşınım koşullarında Nu değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	65
Şekil 5. 5	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşan su miktarı	66
Şekil 5. 6	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3.0 m/s hızda buharlaşan su miktarı	67
Şekil 5. 7	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 2.2 m/s hızda buharlaşan su miktarı	67
Şekil 5. 8	Yivli boruda $T_{bes}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması durumunda farklı zorlanmış taşınım koşullarında buharlaşan su miktarı	68
Şekil 5. 9	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3.0 m/s hızda h_c ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) değerleri	68
Şekil 5. 10	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşma oranı.....	69
Şekil 5. 11	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3 m/s hızda buharlaşma oranı.....	69
Şekil 5. 12	Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 2.2 m/s hızda buharlaşma oranı.....	70

Şekil 5. 13	Yivli boruda farklı besleme suyu sıcaklıklarında 1.5 m/s hava hızında $h_m/(P_d-P_v)$ (m/kPa.s) değerleri.....	71
Şekil 5. 14	Referans düz boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşan su miktarı	71
Şekil 5. 15	Referans düz boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşma oranı	72
Şekil 5. 16	Farklı besleme suyu debilerinde ($T_{bes}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$) yivli boruda Nu değerlerinin Re_a ile değişimi	72
Şekil 5. 17	Farklı besleme suyu debilerinde ($T_{bes}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$) yivli boruda Nu değerlerinin Re_a ile değişimi	73
Şekil 5. 18	Referans düz boru ile yivli boruda taşınım ile kütle geçiş katsayısı (h_m) (m/s)	74
Şekil 5. 19	Referans düz boru ile yivli boruda ısı taşınım katsayısı (h_c) ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	74
Şekil 5. 20	Referans düz boru ile yivli boruda buharlaşan su miktarı ($T_{bes}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$) ...	75
Şekil 5. 21	Referans düz boru ile yivli boruda buharlaşma oranı ($T_{bes}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	75
Şekil 5. 22	Yivli boruda farklı hızlarda farklı sıcaklıklarda Sh sayısının değişimi	76
Şekil 5. 23	Colburn eşitliği ile deneysel bulguların karşılaştırılması	77
Şekil 5. 24	Akış tiplerini içeren şablonda [19] deneysel sonuçların belirlenmesi.....	78
Şekil 5. 25	Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (1.5 m/s) ..	79
Şekil 5. 26	Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (3 m/s) ...	80
Şekil 5. 27	Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (2.2 m/s) ..	80
Şekil 5. 28	Yivli boru korelasyon verilerinin (Nu) hata analizi	81
Şekil 5. 29	Yivli boru deneysel verilerinin (Nu) korelasyon ile karşılaştırılması.....	82
Şekil 5. 30	Deneysel ve ısı-kütle benzeşimi sonucunda belirlenen (Sh) değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 5. 31	Yivli ve referans düz boruda düşen su filminin Nu değerlerinin, su filminin Reynolds sayısına bağlı değişimi	83
Şekil 5. 32	Düşen su filmi için belirlenen Nu sayılarının literatür ile karşılaştırılması	84
Şekil 5. 33	Deneysel çalışmanın birinci yasa analizi sonucunda Q_s , Q_a değerlerinin $\pm\%20$ hata yüzdesi.....	84
Şekil 5. 34	Birinci yasa analizi sonucunda bulunan fark oranına bağlı olarak deneysel çalışmanın yüzdesel dağılımı	85
Şekil 6. 1	Çözüm ağının (5 bölmeli) boru yüzeyinde görünümü.....	93
Şekil 6. 2	Çözüm ağının (50 bölmeli) boru yüzeyinde görünümü.....	94
Şekil 6. 3	Çözüm ağının etkinliğinin sayısal çözüme katkısı.....	94
Şekil 6. 4	a) Burgulu trapez yivli boru modeli b) Kullanılan çözüm ağı.....	95
Şekil 6. 5	Çözüm ağının uzaktan görünümü	96
Şekil 6. 6	Referans düz borudaki yakınsaklık kriteri, 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi	97
Şekil 6. 7	Yivli Borudaki yakınsaklık kriteri, 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi	97
Şekil 6. 8	x-z koordinatlarında referans düz boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	98
Şekil 6. 9	Referans düz borunun sayısal çözümünde test hücresi içinde uzaktan görünüşü	100

Şekil 6. 10	Referans düz borunun test hücresi içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı 101
Şekil 6. 11	Yatay boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılmasının uzaktan iki boyutlu ve yakından üç boyutlu görünüşü 101
Şekil 6. 12	x-z koordinatlarında yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı 101
Şekil 6. 13	a) Üst yüzeydeki yiv çevresindeki sıcaklık dağılımı b) Alt yüzeydeki yiv çevresindeki sıcaklık dağılımı 102
Şekil 6. 14	Üç boyutlu yivli boru modelinin yüzeyindeki sıcaklık dağılımı 102
Şekil 6. 15	Test hücresindeki yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımının uzaktan ve yakından görünüşü 103
Şekil 6. 16	Test hücresindeki yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılması 103

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1	Tek boru ile yapılan çalışmaların özellikleri 8
Çizelge 1. 2	Genişletilmiş yüzeyli boru ile yapılan çalışmaların özellikleri 9
Çizelge 1. 3	Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan boru demeti özellikleri tablosu..... 12
Çizelge 1. 4	Korelasyon tablosu 13
Çizelge 1. 5	Hilpert korelasyonun sabitleri [69] 16
Çizelge 1. 6	Zhukauskas korelasyonunun sabitleri [70]..... 16
Çizelge 4. 1	Deney planı..... 51
Çizelge 4. 2	Burgulu trapez yivli borunun özellikleri 52
Çizelge 4. 3	Görüntü işleme işlem seviyeleri ve kullanım alanları [77] 54
Çizelge 4. 4	Burgulu yivli boruların katmanlarına göre alan oranı 61
Çizelge 4. 5	Eksenel yivli boruların katmanlarına göre alan oranı..... 61
Çizelge 5. 1	Nu korelasyonunun çalışma aralığı 81
Çizelge 6. 1	Referans düz boru için çözüm ağının belirlenmesi 92
Çizelge 6. 2	Referans düz boru ve yivli boru için sayısal sonuçlar 99
Çizelge 6. 3	Referans düz boru ve yivli borunun karşılaştırması için sayısal sonuçlar 99
Çizelge 7. 1	Yivli boru ve referans düz boru deneylerinin belirsizlik değerleri..... 111

**BORULARIN DIŞ YÜZEYİNDEKİ HAREKETLİ SIVI FİLMİNDEN OLAN ISI VE
KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

Cenk ONAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Bu doktora tez çalışmasında farklı geometrilere sahip boruların dış yüzeyindeki hareketli sıvı filminden olan ısı ve kütle transferi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Sekiz ana bölümden oluşan bu tez çalışmasının, birinci bölümünde doktora tez çalışması ile ortaya konulan ana fikrin uygulanabilirliği, amacı ve hipotez ifade edilmiştir. Aynı zamanda literatürde şu ana kadar yapılan çalışmalar incelenmiş ve araştırmacıların sonuçlarına yer verilmiştir.

İkinci bölümde sistem tasarımında ve matematiksel modelde kullanılacak olan temel kavramlardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde tasarlanan test hücresinde eşzamanlı ısı ve kütle transferi için model oluşturulmuştur. Matematiksel modelde kullanılan hesap metodundan bahsedilmiştir.

Deneysel kısım olan dördüncü bölümde deney düzeneğinde yapılan deneylerin sınıflandırmasından bahsedilmiştir ve deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Zorlanmış taşınım şartlarında farklı hava hızlarında, besleme suyu sıcaklıklarında ve akış debilerinde yivli borunun testleri yapılmıştır. Aynı şekilde, farklı hava hızlarında, besleme suyu sıcaklıklarında ve akış debilerinde referans düz borunun testleri yapılmıştır. Sayısal görüntü işleme metotları araştırılmış ve deney düzeneğinde yapılan görüntülemeler üzerinde bu metotlar uygulanarak ıslak yüzey alan yüzdesi belirlenmiştir. MATLAB programı görüntü işleme araç çubuğu kullanılarak farklı

geometrilili yivlere sahip borular için görüntü işleme analizi yapılarak, sonuçlarına yer verilmiştir.

Her iki tip boru için ısı ve kütle transferinin çözümlenmesinin ardından zorlanmış taşınım şartlarında, yivli boruda sıvı-gaz arayüzeyindeki Nu sayısı için $Nu_g = a (Pr)^{1/3} (Re_a)^b (Re_s)^c$ korelasyonu önerilmiştir.

Altıncı bölümde burgulu trapez yivli ve referans düz borunun test hücresi içerisinde, Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile sayısal analizi yapılmıştır. Üç boyutlu modeli oluşturulan boruların, çözüm ağı ICEM CFD ile yapılmıştır. Yiv ve boru yüzeylerindeki sıcaklık dağılımları zorlanmış taşınım koşulları için belirlenmiştir. Yüzey ısı transfer katsayısı, Nu değerleri ve yüzey sıcaklıkları sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölümde eşzamanlı ısı ve kütle transferinin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan deneylerin belirsizlik analizi yapılarak sistemin hatasız yüzde sonuçları verilmiştir.

Sekizinci bölümde ise doktora tezinin sonuçları ve öneriler belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Evaporasyon, görüntü işleme, ısı transferi, kütle transferi, düşen su filmi

**HEAT AND MASS TRANSFER ANALYSIS OF THE FALLING FILM OUTSIDE
THE HORIZONTAL TUBES**

Cenk ONAN

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

In this doctoral dissertation, heat and mass transfer of falling film liquid outside the tubes which are different-geometrical shaped tubes has been examined experimentally and numerically.

In the first section of this thesis study consisting of eight main sections, applicability of main idea, purpose and hypothesis presented with this doctoral dissertation has been expressed. Beside, studies which have been carried out until now was examined and results of researches were included in literature.

In the second section, some basic concepts will be used in the system design and mathematical model have been mentioned.

In the third section, model for simultaneous heat and mass transfer has been formed in the designed test cell. Calculation method will be used in the mathematical model have been mentioned.

In the fourth section, as experimental part, classification of made experiments on experiment mechanism has been mentioned and experimental studies have been explained. Grooved tube tests have been performed in the forced convection conditions at different air speeds, feeding water temperatures and flow rate. At the same way, reference smooth tube tests performed at different air speeds, feeding water temperatures and flow rates. Numerical image processing methods has been searched and to be applied on these methods displays made on experiment

mechanism finally wet surface area percentage has been determined. Image analyses for different geometrical grooved tubes are done as using MATLAB program image processing toolbar and their results has been presented.

After heat and mass transfer analysis of both of them, $Nu_g = a (Pr)^{1/3} (Re_a)^b (Re_s)^c$ correlation for Nu number in liquid-gas surface at grooved tube have been suggested at forced convection conditions.

At sixth section, numerical analysis with ANSYS Fluent CFD software into helically trapezoid grooved and smooth reference tube in the test cell has been carried out. Meshing of tubes formed their three dimensional model has been performed through ICEM CFD. Temperature distribution on grooves and tube surfaces have been determined for forced convection conditions. Surface heat transfer coefficient, Nu values and surface temperatures with their numerical analysis results have been compared with experimental results.

At seventh section, as carrying out uncertainty analysis of experiments aimed at determining simultaneous heat and mass transfer, error results of systems have been given.

At eighth section, results of doctoral dissertation and suggestions have been determined.

Keywords: Evaporation, image processing, heat transfer, mass transfer, falling film

1.1 Literatür Özeti

Yatay tüpler üzerindeki sıvı film akışına birçok endüstriyel proseste örneğin kimyevi petrol rafinesinde, ısı değıştircilerinde rastlanmaktadır. Bu akışlar tuzdan arındırma, soğutma ve gıda, mandıra endüstrilerinde de önemlidir. Buralarda kullanılan ısı değıştirciler düşük sıvı besleme debilerinde ve küçük sıcaklık aralıklarında yüksek ısı transfer katsayılarına sahiptir. Düşen film tipi akışa sahip ısı değıştircilerinin tasarımı genellikle ampirik veriler ve ampirik korelasyonlar ile yapılmaktadır. Düşen film tipi ısı değıştircilerinde en çok yaygın geometri yatay boru demetidir.

Yapılan çalışmalar incelenirken, düşen film tipi akışa sahip deneysel çalışmaların, kullanılan film akışkanının cinsine, boru malzemesine, boru sayısı ve dizilişine, ısı transferi modeline göre farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Çalışmalar 4 ana grupta ifade edilmiştir.

- Absorpsiyonlu sistemler için absorberde, Lityum bromür akışkanı ile düşen sıvı filmi inceleyen çalışmalar
- Yatay boru ve demeti üzerinden düşen sıvı filmini inceleyen çalışmalar
- Isı değıştircisi modeli üzerinden düşen sıvı filmini inceleyen çalışmalar
- Tuzdan arındırma sistemleri için düşen sıvı filmini inceleyen çalışmalar

1936 yılında, Adams vd. [1] ısı değıştircilerinde düşen film tipi akış üzerine çalışmışlardır. Borular üzerinden akan sıvının basınç düşümünün ihmal edilebilir olduğu yerleri, ihtiyaç duyulan soğutma sıvısı miktarının az olduğu yerleri ve ısı transfer

katsayılarının yüksek olduğu yerleri çalışmalarında ifade etmişlerdir. Maron-Moalem vd. [2] deneysel olarak birçok boru üzerinden düşen sıvı film akışını incelemişler ve damlama karakteristiği üzerine yoğunlaşmışlardır. 1980 yılında Yung vd. [3] akış tiplerinin değişimleri ile ilgili çalışmışlardır ve kapilarite sabiti (ξ) üzerinden kapilarite etkisi ile “damlacıklı akış” tipinden “jet akış” tipine geçiş için kütleli debiyi birleştirmişlerdir. Rogers [4] hareketi ve yatay tüpler üzerine düşen laminar film akışı için enerji denklemlerini integral metodu kullanarak çözümlenmiştir. Herhangi bir noktadaki laminar film kalınlığını Reynolds sayısının, Arşimet sayısı (Ar) ve yatay borudaki açılal pozisyonun fonksiyonu olarak denklemlerle ifade etmiştir.

Liu vd. [5] çalışmasında evaporatördeki yatay boru demeti üzerine düşen su filminin buharlaşmasındaki ısı transferi için sayısal simülasyon ve deneysel çalışma yapmışlardır. Yatay olarak ısıtılmış boruların üzerine düşen su filminin ısı transfer katsayılarını hesaplamak için sırasıyla bir laminar model ve bir de türbülanslı model kabul edilmiştir. Isıtılmış boru etrafındaki hesaplama alanı; en üst bölge durgun bölge ve yan bölge serbest film bölgesi olarak bölümlere ayrılmıştır. Yaptıkları çalışmada düz yatay boru demetli buharlaştırıcı üzerinde, düşen su filminin ısı ve kütle transferi için deneysel bir çalışma yapıp, sayısal bir model geliştirmişlerdir. Sıcak yatay borular üzerine düşen su filminin ısı ve kütle transfer katsayılarını, laminar ve türbülanslı modelde hesaplamışlardır. Bu iki akış modeli ile deneysel veriler arasında karşılaştırmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere, oluşturdukları model üzerinde basit bir boyutsuz düzeltme önermişlerdir. Küçük boru çaplarında yüksek ısı transfer katsayıları belirlemişlerdir ve boru çapının ısı transferi üzerinde belirgin derecede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Louahlia-Gualous vd. [6] çalışmasında, ters ısı iletimi problemi çözülerek sayısal sonuçları, su tabakasının düşen film tipi akışı için yerel ısı transferinde deneysel sonuçları sunulmuştur. Hava hızı ve sıvı filminin debisi arttıkça veya giriş film sıcaklığı düştükçe yerel ısı transfer katsayıları artmaktadır. Ortalama ısı transfer katsayıları için korelasyonlar üst üste akışın yokluğunda, durgunluk bölgesi için, termal olarak gelişmiş bölge için ve ısıtılan silindirin alt bölgesi için önerilmiştir. Armbruster ve Mitrovic [7] çalışmalarında bir yatay borudan altındaki boruya serbestçe düşen suyun evaporatif

soğutma deney sonuçlarını vermişlerdir. Su akışı, yukarıya doğru akıp giden hava akışına maruz kalır ve bu su akışındaki su sıcaklığının değişimi ölçülmüştür. Belirli giriş şartlarında, havanın nemi ve hızına ve de boru yerleşimine bağlı olarak su sıcaklığındaki düşüş gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda, buharlaşan suyun soğutmasını hesaplamak için ampirik bir denklem önerilmiştir. Deneylerin temel amacı, yatay ısıtılmamış borular üzerinden akan su ile evaporatif soğutmada, hava akışının etkisini araştırmaktır. Bu deneylerde hava akışı için, havanın hızının, sıcaklığının ve neminin kontrol edilip değiştirilebildiği kapalı bir döngü kullanılmıştır. Hu ve Jacobi [8,9] çalışmalarında, damlacıklı ve jet tipi akışlarda ayrış yeri aralığına bağlı değişimler gözlemlenmiştir. Sıvı filmi bir borudan diğerine akarken, akış ayırık damlacıklı, birbirinden ayırık jet veya sürekli perde akış formunu almaktadır. Deneyler ile termofiziksel özellikler ve geometrik parametrelerin (damlacıklı ve jet akışta) etkisi keşfedilerek, tanıtılmıştır. Bu çalışmadaki şartlarda, yüksek Ga sayılı akışkanlar için Reynolds sayısının azalması ile açıklık alanı artmaktadır. Düşük Ga sayılı akışkanlar için ise açıklık alanı Reynolds sayısından bağımsızdır. Küçük borularda, boru çapı ile açıklık alan boşluğu çok az artar. Büyük tüplerde ise boru boyutundan bağımsızdır. Açıklık alan boşluğu, boru boşluğundan bağımsız olmasına rağmen, jet akışın tipi, jet akıştaki dalgaboyu ve boru boşluğu arasındaki ilişki bazı koşullarda gözlemlenmiştir. Jet akışın tipinin nitelikli bir çalışma ile büyük ölçüde boru boşluğuna bağlı olduğu gösterilmiştir.

Diğer bir çalışmada ise Hasan ve Siren [10] tarafından düz ve kanatlı boru demeti için deneyler yapılmıştır. Evaporatif olarak soğutulan 2 adet ısı değiştiricinin performansı, hava akış debilerinde ve sıcak su giriş sıcaklıklarında, benzer çalışma şartları altında araştırılmıştır. Isı değiştiriciler aynı hacmi işgal eden düz ve plaka kanatlı yuvarlak borulardan oluşmaktadır. Kapalı devre sirküle edilen sprej suyu boru ve kanatların korunmasız yüzeylerine enjekte edilir. Hava ve sprej suyu arasındaki temas, evaporatif ısı transferiyle sonuçlanır. Kanat konfigürasyonu, 0.5 mm kalınlığında bakır plakaların borular arasına konulmasıyla inşa edilmiştir ve toplam alan oranı dördür. Plaka kanatlı boru için ısı transferinde önemli bir artış belirlenmiştir. Hava hızları 1.66 m/s'den 3.57 m/s'e kadar, artış %92 ile % 140 arasında bulunmuştur. Düz ve kanatlı boruların termal performansını hesaplamak için sprej su sıcaklığının sabit farz edildiği bir ısı değiştiricisi modeli kullanılmıştır. Islak kanatlı yüzeyler, kuru yüzeylerle karşılaştırıldığında düşük

kanat verimi göstermiştir. Hacimsel termal iletkenliğin, birim boydaki hava basınç düşümüne oranı enerji indeksi olarak tanımlanmıştır ve 2 ısı değiştiricisi için bulunmuştur. Aynı enerji indeksinde, kanatlı borularla dolu olan hacmin daha yüksek termal faydası olduğu gözler önüne serilmiştir.

Chyu vd. [11] tarafından amonyak/yağlayıcı madde karışımının 3x5 genişletilmiş yüzeyli boru demeti üzerinde kaynaması ile gövde tarafı ısı transfer katsayılarının belirlenmesi sağlanmıştır. Testler ısı akısının $3.2 - 32.0 \text{ kW/m}^2$ aralığında, simule edilen giriş kalitesi $0 - 0.4$, doyma sıcaklığı -13.2 ve $+7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ve yağlayıcı madde konsantrasyonu 0 ile %10 arasında gerçekleştirilmiştir. Veriler, demet etkisinin yüksek doyma sıcaklıklarında daha belirgin olduğunu göstermektedir. Düşük doyma sıcaklıklarında ısı transfer katsayısı verilerinden alt satırdaki birçok veri, tek boruya göre daha düşüktür.

Kim ve Kang [12] yaptıkları çalışmada hidrofilik yüzey işleminin farklı bakır borularda dış duvar yüzeyinden olan evaporatif ısı transferinde etkisini incelemişlerdir ve düz, spiral, korige(oluklu) ve düşük(alçak) kanatlı boruları test boruları olarak seçmişlerdir.

Mohammed [13] çalışmasında dönme hızının düşen film akışında ki akış tipi geçişlerini, film kalınlıklarını ve boyutsuz dalgaboyunu nasıl etkilediğini araştırmıştır. Deneysel sonuçlara göre dönen bir boru üzerinden sıvı filmi düşerken, akış tipi geçişleri düşük Re sayılarında başlamaktadır. Borunun dönmesi esnasında meydana gelen dengesiz düşen filmi engellemek için borunun dönme hızı, maksimum dönme hızını aşmamalıdır. Film kalınlığının değeri döndürme hızının artmasıyla hafifçe azalmıştır. Re sayısı 285 ve dönme hızı 300 rpm olduğunda su filminin kalınlığında %12 'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Yüksek viskoziteli akışkanlar için borunun dönme hızındaki artış ile boyutsuz dalgaboyunda açıkça bir düşüş gerçekleşmiştir. Diğer bir yandan, düşük vizkoziteli (su ve %50 su, %50 etilen glikol karışımı) akışkanlar için çok az etkilediği gözlemlenmiştir.

Mitrovic [14] yatay ısıtılmış tüplerlerden düşen soğutulmuş sıvı film akışına olan ısı transferini ve mekanizmasını deneysel olarak çalışmıştır. Deneysel sonuçlar, akış modelinin yalnızca filmin Reynolds sayısına bağlı olmadığını, boruların aralıklarında bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma göstermektedir ki su için damlacıklı akış tipinden jet akış tipine geçiş Reynolds sayısının 150 ile 200 aralığında, jet akış tipinden perde

akış tipine geçiş ise Reynolds sayısının 315 ile 600 aralığında meydana gelmektedir. Ribastki ve Jacobi [15] 'nin derleme çalışması yatay tip düşen film tipi evaporatörler hakkındaki mevcut literatürü kapsamaktadır ve prosesin teknik zorluklarına odaklanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda tek düz boru, genişletilmiş yüzeyler, boru demetleri üzerindeki ısı transfer performansını etkileyen akış model çalışmalarını ve deneysel parametreleri de içerir. Matematik modellerin, ısı transfer katsayılarının ve akış tiplerini tanımlamak için kullanılan ampirik korelasyonların geliştirilmesi için literatürün kapsamlı incelemesi sunulmuştur. Rogers ve Goindi [16] büyük çaplı yatay boru üzerinden düşen suyun film kalınlığını deneysel olarak ölçmüştür. Laminar düşen filmlerde ölçülen kalınlıklarla teorik değerler karşılaştırılmış ve film kalınlığını önceden tahmin eden yeni bir korelasyon geliştirmiştir.

$$\left(\frac{\delta}{d}\right)_{min} = 1.186 Re^{1/3} Ar^{-1/3} \quad (1.1)$$

Yatay borulu evaporatörün, boru demeti üzerinden akan sıvının hidrodinamiğinin ve ısı transferinin simule edilmesi için Kocamustafaogullari ve Chen [17] tarafından teorik analizi sunulmuştur. Bir borudan bir altındakine sıvı düşüşü borunun en üstüne üniform serbest düşme hızı ile çarpan ince sıvı jet akışı gibi düşünülmektedir. Isıl denklemlerin ve hidrodinamiğin çözümü sonlu elemanlar metodu ile elde edilmiştir. Sıvı film kalınlığı ve yerel ortalama ısı transfer katsayıları sabit ısı akısı durumu ile izotermal sınır koşulları için elde edilmiştir. Damlacıklı ya da jet akış tipinde, iki komşu damlacıklı akış ya da jet akış arasındaki uzaklık, sabit bir değere sahiptir. Bu uzaklık düşen filmin dalgaboyu “ λ ” olarak tanımlanmıştır. Filmin tipine ve filmin kalınlığına ilaveten, dalgaboyunda düşen filmin akışının davranışını belirlemek için önemli bir parametre olduğu düşünülmüştür. Kritik dalgaboyu, Taylor dalgaboyu, Lienhard ve Wong [18] tarafından verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir.

$$\lambda_{kritik} = 2\pi \sqrt{\left(\frac{g\Delta\rho}{\sigma} + \frac{2}{d^2}\right)^{-1}} \quad (1.2)$$

$$\lambda = \lambda_{kritik} \sqrt{3} \quad (1.3)$$

Boru çapının etkisi, boru aralıkları ve sıvı debilerinin film dalga boyuna etkisi deneysel olarak Hu ve Jacobi [8] tarafından 4 akışkan için incelenmiştir. Dalga boyunun sıvı debisine bağlı olduğunu ve Re sayısındaki artış ile düştüğünü belirtmişlerdir. Boru

çapına bağlı zayıf bir bağıllık olduğunu gözlemlemişlerdir. Boru aralıklarının da aynı şekilde en zayıf ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, dalga boyu Re , $Ga^{1/4}$ ve boru çapına bağlı olarak korele edilmiştir ve yeni geniş ölçüde uygulanabilir bir korelasyon verilmiştir. Düşen su filmi için ısı transfer katsayısını, denklem 1.4 yardımıyla hesaplamışlardır [19]. Borunun ortalama yüzey sıcaklığını ve düşen su filminin giriş suyu sıcaklığını belirleyerek, ısı transfer katsayısını farklı deney koşulları için hesap etmişlerdir.

$$h_{ff} = \frac{Q_t}{A_c(T_y - T_{bes})} \quad (1.4)$$

Düşen su filminin Nu sayısını ise denklem 1.5 ile hesaplamışlardır [19].

$$Nu_{ff} = \left(\frac{g^2}{g}\right)^{1/3} \frac{h}{k} \quad (1.5)$$

Yung vd. [20] düşük viskoziteli sıvılar örneğin su, etil alkol ve amonyak için dalga boyunun belirlenmesi amacıyla denklem geliştirmiştir. Diğer bir taraftan yüksek viskoziteli sıvılar için Taghavi-Tafreshi ve Dhiri [21] dalgaboyunun düşük viskoziteli sıvılara göre daha büyük olduğunu rapor etmişlerdir. Drögemüller [22] deneysel olarak yüksek viskoziteli örneğin gliserin veya su, gliserin karışımı gibi akışkanların düşen film tipi akıştaki davranışını çalışmıştır. Ruan vd. [23] karşı akımlı gaz akışında sıvı besleme yüksekliğinin düşen film akışındaki, akış tipi geçişlerine etkisini yatay borular üzerinden akan sıvı için araştırmışlardır. Akış tipi geçişlerine olan etkileri, sıvı özelliklerine bağlı olarak göstermişler ve değişkenleri, film kalınlığı açısından açıklamışlardır. Genellikle, artan gaz hızı ile birlikte geçişlerdeki gecikme azalmaktadır. Düşen film akış tipi geçişlerinde, karşı akımlı gaz akış etkilerini öngören bir korelasyon geliştirilmişlerdir. Genişletilmiş yüzeyli borular ısı transferini arttırmak için geniş ölçüde yatay düşen film tipi ısı değiştiricilerinde kullanılmaktadır [24].

Roques ve Thome [25] akış tiplerini ve geçişlerini 4 çeşit genişletilmiş yüzeyli boru için sunmuşlardır. Bunlar Wieland Gewa-K40 (40 fpi), Wieland Gewa-K19 (19 fpi) ve Wolverine alçak kanatlı (26 fpi & 29 fpi) borularıdır. Bu borular ve düz boru arasındaki karşılaştırma kanatların ve kanat yoğunluğunun geçişler üzerindeki etkisini görmek için yapılmıştır. Bulunan temel bulgu yüksek kanat yoğunluğunun (40 fpi) düz boru geçişleriyle kıyaslandığında geçişe çok fazla etki etmediğidir. Fakat düşük kanat

yoğunlukları (29 fpi ve 26 fpi) geçiş Reynolds sayısını artırma eğilimindedir. Liu ve Yi [26] tarafından yapılan deneysel bir çalışma da su ve R11'in evaporasyonu için yatay düz boru ve 2 çeşit biçim verilmiş boru üzerinden düşen film için incelenmiştir. Deneysel sonuçlar biçim verilmiş borunun düşen film evaporasyonunda ısı transferini çokca yükselttiğini hem su hem R11 için göstermiştir.

Cosenza ve Vliet [27] düz yatay boru yüzeyleri için düşen filmin absorpsiyonunu incelemişlerdir. İçeriden soğutulan yatay borular üzerinden akan LiBr su çözeltisinin su buharı ile absorpsiyonunun deneysel verilerini elde etmişlerdir. Choudhury [28] soğutulmuş yatay borular üzerinden akan absorban çözeltisinin filmi analiz etmiştir ve toplam kütle akısı ile debi arasındaki bağıntıya dayanarak belirli tüp boyutu için optimum akış debisini elde etmişlerdir.

Perde akış tipi ile düşen soğutulmuş su filminde duyulur konveksiyonla ısı transferi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir; Sernas [29] Parken'in [30] deneysel verilerini $1150 < Re < 6000$ aralığındaki soğutulmuş düşen su filmi için korele etmiştir ve aşağıdaki ampirik korelasyonu ortaya koymuştur.

$$\overline{Nu} = CRe^{0.24}Pr^{0.66} \quad (1.6)$$

25 mm çaplı boru için C değeri 0.01925 ve 50 mm çaplı boru için 0.01729 verilmiştir. Furukawa ve arkadaşları [31] absorber ünitesinde kullanılmak üzere iki çeşit çift delikli boru geliştirmişlerdir. Bu boruların ısı transfer verimini, konvansiyonel olarak kullanılan düz borulardan daha yüksek olarak bulmuşlardır.

Hu ve Jacobi [9] düşen filmin biçiminin ısı transferine etkisini ve Re sayısı, fiziksel özellikler, filmin biçimi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Soğutulmuş perde akışlı düşen su filminin ısı transfer katsayıları için aşağıdaki ampirik korelasyonu ortaya koymuştur.

$$Nu = 2.194CRe^{0.23}Pr^{0.14}Ar^{-0.20}\left(\frac{S}{D}\right)^{0.07} \quad (1.7)$$

Deneysel aralık olarak; $Re > 1900$, $D=15.88-22.23$ mm, $T_y = 20-40$ °C tüp aralığı ise $S= 5-50$ mm'dir. Bu korelasyona göre, tüp aralığının (S) boru demetinin ısı transferine çok az bir etkisi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, tek borudaki ısı transferi genellikle boru demetinin ortalama ısı transfer katsayısını ortaya koymaktadır.

Çizelge 1. 1 Tek boru ile yapılan çalışmaların özellikleri

Kaynak	Akışkan	Yüzey Malzemesi	D_{ext} (mm)	H (mm)	Γ ($\times 10^3 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)	T_{sat} veya T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ (kWm^{-2})
[30]	Su	Pirinç	25.4, 50.8	3.2	133 - 373	45 - 127	15.8 - 78.8
[32]	Su	Bakır	25.4	12.7, 25.4, 50.8	4 - 40	27, 50	0 - 83
[33]	Su	Bakır	25.4	3	37 - 110	99.4	2 - 100
[34]	Su	Pirinç	25.4, 50.8	-	276 - 756	49 - 127	16 - 79
[35],[36],[37]	Su	Bakır	25.4	3 - 63.5	21.3 - 156	99.4	2 - 208
[38]	Su, Etilalkol	Bakır	25.4	12.7, 25.4, 50.8	2.5 - 50	57	0 - 80
[14]	Su, İzopropilalkol	Bakır	18	4.5 - 87	38 - 130	25, 21.5	18.4, 9.4
[39]	Su	Pirinç	25.4, 50.8	6.3	135 - 366	49 - 127	30 - 80
[40]	Su, İzopropilalkol	Bakır	19.5	7.8 - 48.8	5 - 150	9 - 50	0 - 150
[41]	Su, Etilenglikol, Su-Etilenglikol-Etilenalkol karışımı	Pirinç	9.52, 12.7, 15.87, 19.05, 22.22	0 - 100	0 - 360	25 - 40	0 - 115
[19]	Su, Etilenglikol, Su-Etilenglikol karışımı	Pirinç	15.9, 19.01, 22.22	5 - 50	0 - 360	25 - 40	0 - 115
[42]	Su	Yüzey sabit bir folyo ile kaplanmış	38	10 - 20	40 - 400	42 - 100	15 - 75
[7]	Su	Bakır	19.5	7.8, 2.3, 48.8	10 - 150	20, 35, 50	0
[43]	Su, R-11	Bakır	18	6	15 - 354	99.4, 23.5	2 - 500

Farklı akışkanlar, farklı yüzey malzemesi ve farklı deneysel tasarım parametrelerine bağlı çalışılan literatürdeki tek boru çalışmalarının özellikleri Çizelge 1.1’de özetlenmiştir. Ayrıca genişletilmiş yüzeyli boru ile yapılan çalışmaların özellikleri ise Çizelge 1.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 1. 2 Genişletilmiş yüzeyli boru ile yapılan çalışmaların özellikleri

Makale No	Akışkan	Yüzey Karakteristiği	D_{ext} (mm)	Γ ($\times 10^3 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)	T_d veya T_i ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ (kWm^{-2})
[33]	Su	GEWA- T19C, GEWA- T26B, High Flux	25.4	37 - 110	99.4	2 - 208
[35]	Su	High Flux, GEWA-T19C, GEWA- T26B ve Thermoexcel- E	25.4	21 - 210	99.4	0.6 - 208
[37]	Su	GEWA-T19C, GEWA- T26B, Thermoexcel- E, High Flux	25.4	28 - 212	99.4	1 - 130
[42]	Su ve Etilalkol	High Flux	25.4	2.5 - 50	45, 57	0 - 80
[44]	Su	Boyuna profil boruları	38.0	40 - 400	40- 100	15 - 75
[42]	Su	20 farklı konfigürasyonda boyuna profil boruları	30, 38	40 - 200	42- 100	15 - 75
[43]	Su ve R-11	Yüzeyde koni oyuklar ve helisel kanatlı borular ($1429 \text{ kanat.m}^{-1}$)	18	15 - 354	23.5, 99.4	2 - 500
[45]	Su, Glikol, Su-glikol karışımları	Turbo- BII, Turbo- Chil, Thermoexcel-C	12.7, 19.1	0 - 210	15 - 35	0

Yoon vd. [46] yaptıkları çalışmada absorpsiyonlu soğutucunun absorpsiyon biriminde düz boru, tümsekli düz boru, floral boru ve burgulu floral borularda olan ısı ve kütle transfer süreçlerini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda floral

ve burgulu floral boruların ısı ve kütle transfer performanslarının, düz boruya göre % 40 daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

Yoon vd. [47] yaptıkları çalışmada absorpsiyonlu soğutucunun absorber biriminde düz boru, floral boru ve hydrophilic borunun ısı ve kütle transfer süreçlerini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Ayrıca sulu LiBr çözeltisine surfactant (Normal oktil alkol) madde ekleyerek ısı transfer katsayısının değişimini de incelemişlerdir. Çözelti içerisinde sürfaktif madde olsun ya da olmasın, sonuçlar göstermiştir ki üç tüp içerisinde en yüksek geçirgenliğe sahip olan hidrofilik borudur. Düz boruya göre % 4-73 oranında, floral boruya göre ise % 10-22 oranında ıslak yüzey alanına sahiptir. Sürfaktif madde kullanılmayan deney sonuçlarına göre hidrofilik boruda elde edilen ısı transfer katsayıları düz boruya göre % 10-35, floral boruya göre ise % 5-25 daha yüksektir.

Helbig vd. [48] çalışmalarında hem düz hem de biçim verilmiş dikey borularda su ve sonrasında çeşitli sıvı akışkanlar ile deneysel çalışmalar yapmış, farklı Re sayılarında dalgalı film yapısı için sonuçlar vermiştir.

Sultana vd. [49] yatay borulu absorberlerin dizaynı ve analizi için bir model geliştirmişlerdir. Analiz filmin borular üzerinden akışını, damlacıklı ve jet akışı için içermektedir ve ayrıca serpantin içerisindeki soğutkanın akışınıda içermektedir.

Wang vd. [50] genişletilmiş yüzeyli boruların dışındaki düşen filmin absorpsiyon etkisini değerlendirmek amacıyla yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Boru dışındaki sıvı filminin iç ve dış olmak üzere 2 katmandan meydana geldiğini farz etmişlerdir. Teorik analize göre iç katmandaki sıcaklık, konsantrasyon ve hız dağılımlarının analitik çözümleri yapılmıştır. Dış katmandaki çözümler ise nümerik method ile hesaplanmıştır.

Xie vd. göre [51], absorplama verimi ve soğutma kapasitesinin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ancak çözelti konsantrasyonunun arttırılmasıyla olabilir. Bu sebeple yaptıkları çalışmada yatay boru üzerindeki düşen filmin absorpsiyon mekanizmasını incelemişler ve teorik matematik modelini bir dizi program kullanarak hesaplatmışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki çözelti konsantrasyonunun % 52.5'den % 58.5'e kadar olan sistemlerin soğutma kapasitesi, parabol geometrili çan şeklinde

değişmektedir ve en iyi soğutma etkinliği (COP), konstrasyonun % 57 olması halinde meydana gelmektedir.

Herrera vd. [52], tek etkili amonyak-lityum nitrat kullanan hava soğutmalı 10 kW kapasiteli absorpsiyonlu soğutma sisteminin geliştirilmesi için çalışmışlardır. Generatör yatay borulu düşen film akışlı tiptir. Isıtılan yağ boru demetleri içerisinde, amonyak-lityum nitrat çözeltisi ise boruların dışarısından düşen film akışı şeklinde akmaktadır. Isınınca amonyak buharı meydana gelmektedir. Generatör, 3 sütun ve her bir sütun için 4 satır yatay borudan oluşmaktadır.

Yang ve Shen [53] yaptıkları çalışmada yatay borular üzerinden düşen film tipi akışta farklı parametrelerin (örneğin akış debisi, evaporasyon sıcaklıkları, deniz suyunun kütleli konsantrasyonu ve duvar ile doymuş su arasındaki sıcaklık farkı) ısı transfer katsayısına etkisini incelemişlerdir. İçten ısıtılmış 14mm dış çaplı Alimünyum-pirinç borular kullanılmıştır. Birim boydan düşen su filminin kütleli debisi $0.013 \text{ kg/m.s} < \Gamma < 0.062 \text{ kg/m.s}$ aralığında değiştirilirken bulunan sonuçlar sıvı besleme yüksekliği, evaporasyon kaynama sıcaklığı ve ısı akışı arttıkça ısı transfer katsayısının da arttığını göstermektedir. Bunun yanında yoğunlaşmamış gaz miktarının, ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu belirtmektedirler. Tatlı su ve deniz suyu kullanılması halinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ısı transfer katsayıları arasındaki farkın az olduğu görülmüştür.

Bourounia vd. [54] yatay boru çevresinde, doymamış koşullarda sıvı film akışının ısı transferinin teorik araştırmasını yapmışlardır. Mevcut modellere ek olarak borunun en üstündeki durgunluk bölgesinin analizini yapmışlardır. Çalışmanın sonuçları, direk olarak suyun arındırılması amaçlı yatay borulu düşen film akışlı evaporatörlerin modellenmesinde kullanılabılır.

Liu ve Yi [43], atmosfer basıncında saf su ve su, tuz karışımlarının, yatay düz ve 2 çeşit genişletilmiş yüzeyli boru demetlerinin üzerinden düşen film buharlaşmasındaki ısı transferini incelemişlerdir ve ısı transfer katsayısının artışı gerçekleştirilmeye çalışmışlardır. Düşük maliyetli yuvarlak işlemeli boru düşen filmin buharlaşma ısı transfer katsayısını çokça arttırmaktadır ve bu yüzden pahalı olan ticari borularla örneğin “GEWA-T”, “Thermoexcel-E” ve “High Flux” boruları ile karşılaştırılabilir

yapmaktadır. Deneysel veriler sonucunda taşınım ile ısı transfer katsayısı belirlenmiştir ve ısı akısının $< 10^5 \text{ W/m}^2$ olduğu durumda sabit ısı transfer katsayısı $h \approx 20 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 'dir.

Çizelge 1. 3 Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan boru demeti özellikleri tablosu

Yazarlar	Çözelti giriş sıcaklığı (°C)	Çözeltinin giriş konsantrasyonu (%)	Çözeltinin debisi (kg/ms)	Soğutma suyu giriş sıcaklığı (°C)	Isı transfer katsayısı (kW/m ² K)	Taşınım ile kütle geçiş katsayısı (m/h)	Sistem boru yerleşimi ve geometrik özellikleri
Yoon vd. [55]	47	61	0.0142-0.0303	32	0.571-0.803	0.079-0.116	1 sütun 10 satır d= 15.88 mm
Hoffmann vd. [56]	40-43	57	0.007-0.045	30	0.230-0.630	-	1 sütun 24 satır d=16 mm
Kyung ve Herold [57]	-	60	0.014-0.05	30	0.650-0.950	-	1 sütun 4 ve 8 satır d=19.05 mm s= 25.4 mm
Furukawa vd. [58]	41 ± 1	58 ± 0.5	0.013-0.042	28 ± 0.3	0.700-0.900	0.06-0.18	1 sütun 5 satır d=19.05 mm
Nagaoka vd. [59]	40	58	0.008-0.023	28	0.430-1.250	0.05-0.14	6 sütun 8 satır d=19.05 mm
Kawamatra vd. [60]	40	58	0.008-0.025	28	0.522-1.258	0.08-0.14	-
Yamaguchi vd. [61]	55	62	0.015-0.042	32	0.520-0.650	0.12-0.23	1 sütun 13 satır d=16 mm

Yoon vd. [55] çalışmasında deneysel sistem absorber, generator ve çözelti dağıtıcı sistem ve su soğutma sisteminden oluşmaktadır. Boru çapının absorber performansına etkisine bakmak için 3 farklı çapta (15.88, 12.70 ve 9.52 mm) boru absorber içerisine yerleştirilmiştir. Deneysel verilere göre absorberin ısı ve kütle transfer performansı boru çapının azalması ile artmaktadır. Farklı çözelti sıcaklıklarında ve

konsantrasyonlarında, ısı transfer ve kütle transfer katsayıları Çizelge 1.3’de gösterilmiştir. Çizelge 1.4’de ise literatürdeki araştırmacılar tarafından önerilen korelasyonlar verilmiştir.

Çizelge 1. 4 Korelasyon tablosu

Makale No	Korelasyon	Sistem verileri	Açıklama
Mitrovic [14]	(a) $Nu = 0.0137 (Re)^{0.349} Pr_i ((s/D_{ext})^{0.158} / (1 + \exp(-0.0032 Re^{1.32})))$	Su, tek düz borular	(a) $Re > 320$
Parken vd. [39]	(b) $Nu = 0.042 Re^{0.15} Pr_i$ (c) $Nu = 0.038 Re^{0.15} Pr_i$ (d) $Nu = 0.00082 Re^{0.10} Pr_i^{0.4}$ (e) $Nu = 0.00094 Re^{0.10} Pr_i^{0.4}$	Su, tek düz borular	(b) Kesin olarak taşınım koşullarında $D_{ext} = 25.4$ mm (c) Kesin olarak taşınım koşullarında $D_{ext} = 50.8$ mm (d) Kaynama koşullarında $D_{ext} = 25.4$ mm (e) Kaynama koşullarında $D_{ext} = 50.8$ mm
Rogers vd. [62]	(f) $Nu = 0.2071 Re^{0.24} Pr_i Ar^{-0.111}$	Su, tek düz borular	(f) Özellikler ortalama film sıcaklığında hesaplanmıştır.
Hu ve Jacobi [19]	(g) $Nu = 0.113 Re^{0.85} Pr_i Ar^{-0.27} (1 + s/D_{ext})^{0.04}$ (h) $Nu = 1.378 Re^{0.42} Pr_i Ar^{-0.23} (1 + s/D_{ext})^{0.08}$ (i) $Nu = 2.194 Re^{0.28} Pr_i Ar^{-0.20} (1 + s/D_{ext})^{0.07}$	Su, Etilenglikol, Su-Etilenglikol karışımı, tek düz borular	(g) Damlacıklı akış (h) Jet akış (i) Perde akış

Parker ve Treybal [63] çalışmasında karşı akışlı evaporatif sıvı soğutucuların detaylı analizini, soğutucunun 4 farklı işletme modu için yapmıştır. Bu konuda çalışan ilk araştırmacılardan olan Parker ve Treybal [63] ’ın yaptığı analizde havanın doyma entalpisinin sıcaklığa bağlı olarak lineer olarak değiştiğini varsaymıştır. 19 mm dış çapında çapraz diziliimli borular için ampirik korelasyonlar önerilmiştir. Boru duvarı ile ortamdaki spray su arasında ısı transfer katsayısını,

$$h_s = 704(1.39 + 0.022T_s) \left(\frac{\Gamma}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.8)$$

şeklinde ifade etmiştir ve burada T_s spray su sıcaklığıdır, Γ birim boydaki spray suyun kütleli debisi ve D borunun dış çapıdır. Doymuş hava ve su arayüzeyi ile ortam havası arasındaki kütle geçiş akısı (n),

$$n = 0.049 G_a^{0.905} \quad (1.9)$$

şeklindedir. Burada G_a havanın kütleli akısıdır.

Mitzushina vd. [64] karşı akışlı evaporatif soğutucularda bir dizi testler gerçekleştirmiştir. Boru çapının taşınım ile ısı ve kütle transfer katsayılarına etkisini belirlemek için 12.7, 19.05 ve 40 mm dış çapında olmak üzere 3 adet kangal tip boru kullanılmıştır. Kütle geçiş akısı sonuçları, havanın Re sayısına (Re_a) ve sprej suyunun Re sayısına (Re_s) bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilmiştir.

$$h_s = 2100 \left(\frac{r}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.10)$$

$$nA_v = 5.028 \times 10^{-8} Re_a^{0.9} Re_s^{0.15} D^{-2.6} \quad (1.11)$$

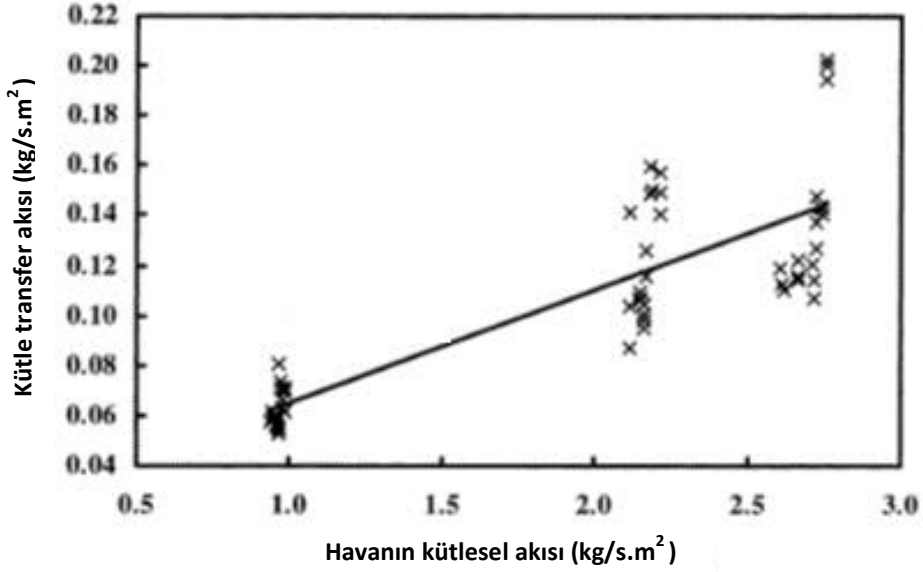
Burada A_v birim hacimdeki temas alanıdır. Korelasyonlar $1.5 \times 10^3 < Re_a < 8.0 \times 10^3$ ve $50 < Re_s < 240$ aralığında geçerlidir. Re_a 'nın baskın olduğu denklem 1.11'de belli olmaktadır.

Diğer bir çalışmada Mitzushina vd. [65] soğutma kulesi içerisinde sprej su sıcaklığının değişimine bağlı olarak evaporatif sıvı soğutucunun dizayn limitlerini belirlemişlerdir. Sprej suyun buharlaşmasını bu çalışmada ihmal etmişlerdir. Niitsu vd. [66] düz ve kanatlı boru demetlerini test etmişlerdir. Düz borular 16 mm dış çapında çapraz dizilime sahiptirler. Düz borular için belirlenen korelasyonlar denklem 1.12 ve denklem 1.13'de ifade edilmiştir.

$$h_s = 990 \left(\frac{r}{D} \right)^{0.46} \quad (1.12)$$

$$n = 0.076 G_a^{0.8} \quad (1.13)$$

Ala ve Kai [67] çalışmada kapalı tip bir soğutma kulesinin teorik analizini yapmış ve bilgisayar modellemesini gerçekleştirmiştir. Kule transfer katsayılarının belirlenebilmesi için önceden yapılan deneysel ölçümler kullanılarak Mizushina vd. [65]'ne ait 174 kW'lık evaporatif sıvı soğutucu modelinin dizayn verileri ile model oluşturulmuştur. Soğutucu modeli, 13 sırada 20 borudan oluşmaktadır ve 34 mm dış çapa sahiptirler, giriş sıcaklığı ise 50 °C dir. Ala ve Kai [67] yaptıkları modelin çıktıları ile deneysel verilerin güç tahminlerinin %1 farklılık gösterdiğini, bu yüzden modelin doğrulandığını belirtmişlerdir.



Şekil 1. 1 Kütle transfer akısı değerlerinin değişimi [67]

Silindir üzerindeki çapraz hava akışı için, yerel Nusselt sayısının θ ile değişimini gösteren deney sonuçları literatürde yer almaktadır. Sonuçlar, yüzeyde oluşan sınır tabakanın gelişiminden önemli ölçüde etkilenmektedir. $Re \leq 10^5$ koşulları göz önüne alındığında, durma noktasından başlayarak Nu sayısı, θ laminar sınır tabaka gelişiminin sonucu olarak, θ arttıkça azalır. Yerel Nusselt sayısının belirlenmesi için [68], $Pr \geq 0,6$ için ön durma noktasında, sınır tabaka çözümlemesi,

$$Nu_{D_{\theta=0}} = 1.15 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \quad (1.14)$$

sonucunu verir.

Yerel Nu sayılarının haricinde, mühendislik hesaplamalarında ortalama Nusselt katsayılarının kullanımı tercih edilmektedir. Deneyel sonuçlar ile çeşitli araştırmacıların ampirik bağıntıları karşılaştırılmıştır.

Hilpert'in korelasyonu [69] yaygın olarak kullanılan bir korelasyondur. Tüm özellikler film sıcaklığında hesaplanmalıdır.

$$\overline{Nu_D} = \frac{\bar{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (1.15)$$

Bu bağıntıda geçen C ve m sabitleri Çizelge 1.5'de verilmiştir. Bu bağıntı, karakteristik uzunluğu D ve sabitleri Çizelge 1.5'de olan değerler için kesiti dairesel olan silindirlerin üzerinden gaz akışı için kullanılabilir.

Çizelge 1. 5 Hilpert korelasyonun sabitleri [69]

Re _D	C	m
0.4 – 4	0.989	0.330
4 – 40	0.911	0.385
40 – 4000	0.683	0.466
4000 – 40000	0.193	0.618
40000 - 400000	0.027	0.805

Çapraz akışta dairesel silindir için diğer bir korelasyon ise, Zhukauskas'ın bağıntısıdır [69] ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (1.16)$$

Bu korelasyonun geçerli olduğu aralık tanımlanacak olursa, Pr sayısı 0.7 ile 500 değerleri arasındadır. Re_D sayısı ise 1 ile 10⁶ değerleri arasında ise korelasyon uygulanabilmektedir. Burada tüm özellikler T_∞ sıcaklığında hesaplanmaktadır. Yalnızca Pr_s değeri, T_y sıcaklığında hesaplanmaktadır. Korelasyon sabitleri Çizelge 1.6'da verilmiştir. Pr sayısına bağlı olarak n üstel fonksiyon katsayısı değişmektedir. Pr≤10 ise, n=0.37 olup, Pr>10 olduğunda n değeri 0.36'dır.

Çizelge 1. 6 Zhukauskas korelasyonunun sabitleri [70]

Re _D	C	m
1 – 40	0.75	0.4
40 – 1000	0.51	0.5
10 ³ – 2x10 ⁵	0.26	0.6
2x10 ⁵ – 10 ⁶	0.076	0.7

Diğer başka bir korelasyonda ise, verilerin aralığından bağımsız olarak, geçerliliği olan Churchill ve Bernstein [71] tarafından önerilmiştir. Tüm Re_D ve Pr sayılarını kapsayan

bu bağıntı, tüm $Re_D Pr > 0.2$ için önerilmektedir. Tüm özelliklerin film sıcaklığında hesaplandığı Churchill ve Bernstein [71] korelasyonu;

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{1/4}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (1.17)$$

şeklindedir.

Literatür araştırması sonucunda, zorlanmış taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine yapılan teorik ve deneysel birçok çalışma olduğu belirlenmiştir. Farklı akış tipleri için yapılan deneyler sonucunda korelasyonlar önerilmiştir. Araştırmacıların, literatürdeki yayınları ve çalışmaları incelendiğinde, düz boru üzerine çalışmaların mevcut olduğu ancak su filmi ile hava ara yüzeyindeki taşınım ile ısı geçiş katsayısı ile taşınım ile kütle transfer katsayısının belirlenmediği görülmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada referans düz boru içinde deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Düşen su filmi akışında, genişletilmiş yüzeyli borular için yalnızca ısı geçişi incelenmiş, eşzamanlı ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği zorlanmış taşınım koşulları üzerine çalışılmamıştır. Yatay boru üzerinden dış hava akışında önceki çalışmalarda belirlenen korelasyonlar oldukça fazladır ve birbirlerini doğruladıkları görülmektedir. Isı transferinin incelendiği, test hücrelerinde yatay düz boru için gerçekleştirilen deneyler doğrulandıktan sonra, yivli boru için deneysel ve sayısal analiz yapılmıştır. Islak yüzey alanının belirlenmesi üzerine yapılan tek çalışmada absorber ısı değiştiricisi üzerinden akış incelenmiş ve ıslak yüzey alan karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Bunun haricindeki diğer çalışmalarda yalnızca görüntüleme ile düşen su filminin akış tipinin, dalgaboyunun, film kalınlığının belirlenmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada, farklı olarak düşen film tipi akışta yiv geometrilerinin ıslak yüzey alanına etkisi irdelenmiştir. Eş zamanlı ısı ve kütle transferinin deneysel olarak incelenmesi sonucunda, elde edilen deneysel bulgular ile oluşturulan Nu ve Sh korelasyonu, burgulu trapez yivli borunun parametrelerine bağlıdır. Yatay boru üzerinden düşen su filmi akışında önceki çalışmalarda düz boru için belirlenen filmin ısı taşınım katsayıları, yivli boru için belirlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Literatürde düz boru ve boru demetleri üzerinde ısı ve kütle transferi çalışmaları deneysel ve teorik olarak yapılmıştır. Ancak yivli boru ve boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada da literatürde ki mevcut çalışmalardan farklı olarak, hareketli film tipi akışta, değişik yiv geometrilerinin ve yivlerin burgulu, aksenal olmasının ısı ve kütle transferine etkisi incelenmiştir. Böylece soğutma kulelerinde, evaporatif soğutucularda, soğurmalı soğutma sistemlerinde, deniz suyunu tuzdan arındırma sistemlerinde, hem ilk yatırım maliyetinin, hem de işletme maliyetinin azaltılması hedeflenmektedir. Isı transferini arttırmak üzere farklı borular incelenmiştir. Bu borular, kapiler etkisi ile akışkanın boru yüzeyini daha iyi şekilde kaplayarak akmasını sağlayacak, böylece kuru alanların önüne geçilecektir.

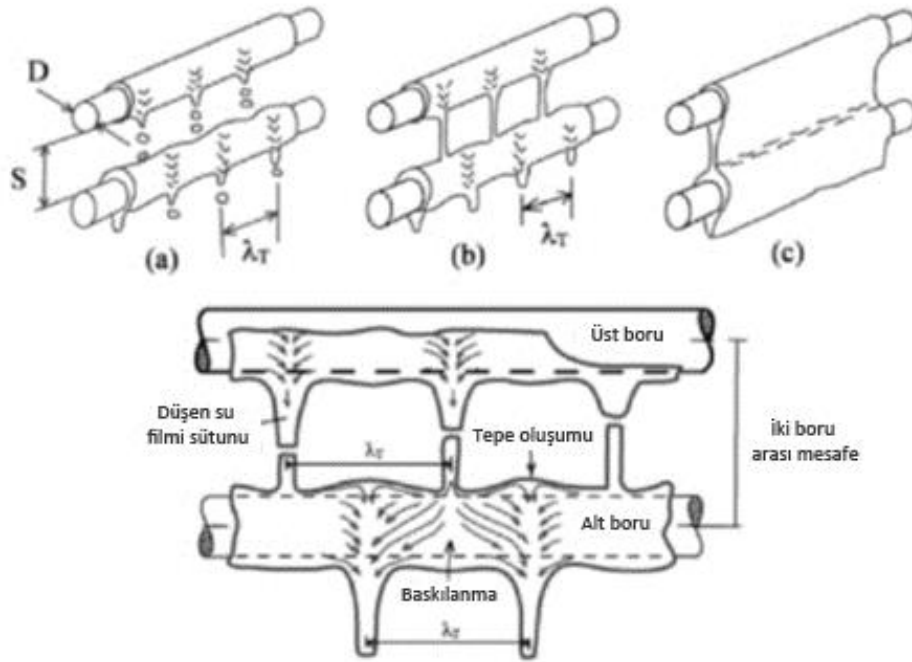
1.3 Hipotez

Eşzamanlı ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği düşen su filmi akışında yivli borular üzerinde yapılan deneyler sonucunda, Nu ve Sh boyutsuz sayıları için korelasyonlar belirlenmiştir. Düşen sıvı filminin farklı geometrilere sahip yivler üzerindeki akışı incelenerek, boruların ıslak yüzey alanı karşılaştırılmış ve aksenal yivlerin, burgulu yivlere göre düşük ıslaklık oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple burgulu yiv geometrilerinin, evaporatif sistemlerde tercih edilmesi önerilmektedir. Referans düz boru ile karşılaştırılan sonuçlar neticesinde sıvı-gaz arayüzeyindeki ısı transfer katsayısının ve taşınım kütle geçiş katsayısının yivli boruda çok değişmediği belirlendiğinden, yüzey alanı fazla olan trapez yivli borunun buharlaşmayı arttırmak için sistemlerde tercih edilmesi önerilmektedir.

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR

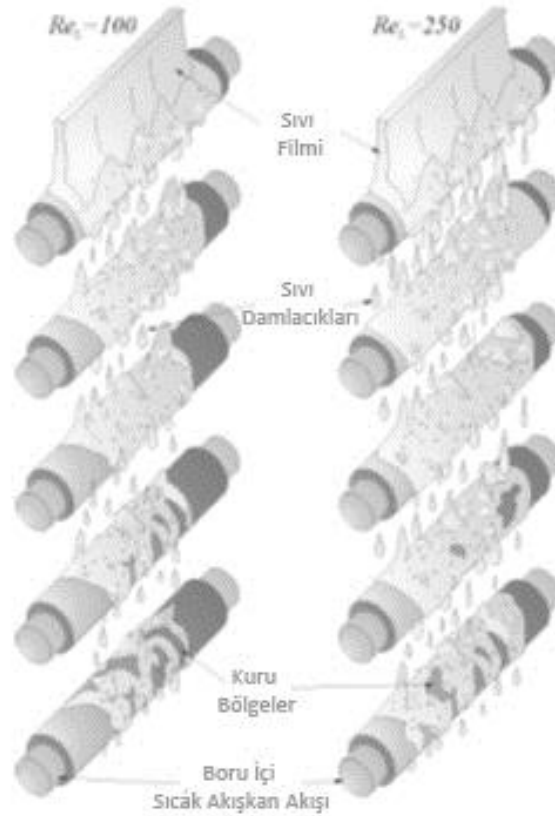
Değişken mekanizmalar düşen film evaporasyonunda önemli rol oynamaktadır. Sıvı film akışlar genellikle vizkozite, yerçekimi ve yüzey gerilim etkilerinin egemenliğindedir. Sıvı film bir yatay borudan diğer bir altındaki boruya akarken akış damlacıklı akış, jet akış yani sütunlar halinde akış veya perde akış yani sürekli levha formunu alabilir.



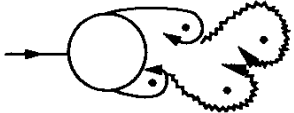
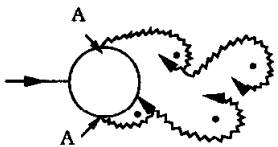
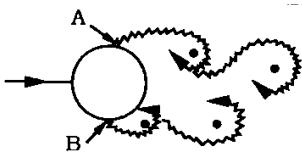
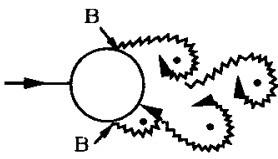
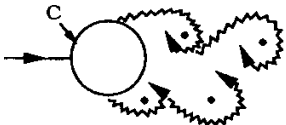
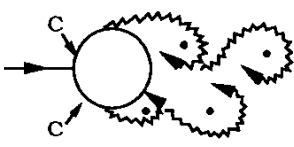
Şekil 2. 1 Düşen film akış tipleri a) damlacıklı akış b) jet akış c) perde tipi akış d) Taylor dengesizliği illüstrasyonu [3]

Düşen jet akışındaki sütun sıvı filmi, durma noktasından itibaren boru boyunca tüm aksenal yönlerde akar. İki sütundan yayılan akımlar üst üste geldiğinde bu bölgede sıvı tepesi biçimlenir (Şekil 2.1). Bu sıvı tepesi borunun çevresi boyunca halka şeklinde akar ve bunlar arasındaki uzaklık Taylor değişkenliğine bağlıdır.

Damlacıklı akış, jet akış ve perde akış başlıca akış tiplerini temsil etmektedir. Damlacıklı-jet ve jet-perde akışları da başlıca olanların arasında yer alan akış tipleri olarak tanımlanmaktadır. Bir ayırmda jet akış modu için yapılmaktadır ve bu ayırım sütunların tüp üzerine çarpma ve tüpten ayrılıştta izafi pozisyonlarına göreler. Jet akıştaki sütunlar üstten ve altta dikey olarak hizada iken sıralı jet akış tipi olarak tanımlanır. Sütunların pozisyonları her bir boru aralığında λ 'nın yarısı kadar yön değıştiryorsa şaşirtmalı jet akış tipi olarak tanımlanır. Yerçekimi kuvvetinin akış yönünde çevre boyunca değışmesinden dolayı sıvı filminin kalınlığı yatay tüp üzerinde tüp çevresi boyunca değışir. Yatay düşen film akışlı bir evaporatörde, sıvı filmin fiziksel formu yalnızca boruyu terk eden sıvının debisine değilde ayrıca Yoon vd. [46] belirttiğı üzere borular arasındaki uzaklığı da (s) bağılıdır. Debi az olduğunda ve boru aralığı fazla olduğunda sıvı akışı genellikle tüpün alt kısmının ayırk noktalarında damlacıklı form şeklindedir. Şekil 2.2'de sıvı filminin nasıl bir form aldığı ve düşen film akışındaki detaylar gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 Film akışının şematik gösterimi ve kuru bölge oluşumu [72]

	Akış görseli	Açıklama	Re aralığı
a)		Ayrılma yoktur. Yavaş akış	$Re < 5$
b)		Simetrik girdap çifti	$5 < Re < 40$
c)		Laminer girdap yolu	$40 < Re < 200$
d)		İz bölgesinde türbülansa geçiş	$200 < Re < 300$
e)		İz bölgesi tamamen türbülanslı A: Laminer sınır tabaka ayrılması	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Kritik altı
f)		A: Laminer sınır tabaka ayrılması B: Türbülanslı sınır tabaka ayrılması; fakat sınır tabaka laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Kritik (geçiş altı)
g)		B: Türbülanslı sınır tabaka ayrılması; sınır tabaka yer yer laminar iken yer yer türbülanslı	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Süperkritik
h)		C: Sınır tabaka tek tarafta tamamen türbülanslı	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Geçiş üstü
ı)		C: Sınır tabaka çift tarafta tamamen türbülanslı	$4 \times 10^6 < Re$ Transkritik

Şekil 2. 3 Silindir üzerinden çapraz akışın sınıflandırılması [73]

Düz yüzeyli silindir üzerindeki çapraz hava akışının rejimleri Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Burada sınır tabaka, akışın iz bölgesi incelenmiştir ve sınır tabaka kalınlığı boru çapı ile karşılaştırıldığında çok küçük bir genişliktedir.

2.1 Akış Tiplerinin Sınıflandırılması

Düşen film tipi akışta gerçekleşen akış tiplerinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu akış tiplerinin sınıflandırılması için Hu ve Jacobi [19]’nin çalışmalarındaki akış tipleri haritasından faydalanılarak deneysel verilerin analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir korelasyon oluşturulurken yaklaşık 100 adet deney verisi kullanılmıştır. Damlacıklı akış bölgesi ile damlacıklı akış-jet akış bölgesi arasındaki geçiş doğrusu,

$$Re_s = 0.074Ga^{0.302} \quad (2.1)$$

denklemleriyle belirlenmiştir. Ortalama karekök hatası (RMS) değeri % 11.0’dır. Damlacıklı akış-jet akış ile jet akış bölgesi arasındaki geçiş doğrusu,

$$Re_s = 0.096Ga^{0.301} \quad (2.2)$$

denklemleriyle belirlenmiştir. Ortalama karekök hatası değeri % 11.2’dir. Jet akış ile jet akış-perde akış bölgesi arasındaki geçiş doğrusu,

$$Re_s = 1.414Ga^{0.233} \quad (2.3)$$

denklemleriyle belirlenmiştir. Ortalama karekök hatası değeri % 5.8’dir. Jet- perde akış ile perde akış bölgesi arasındaki geçiş doğrusu ise,

$$Re_s = 1.448Ga^{0.236} \quad (2.4)$$

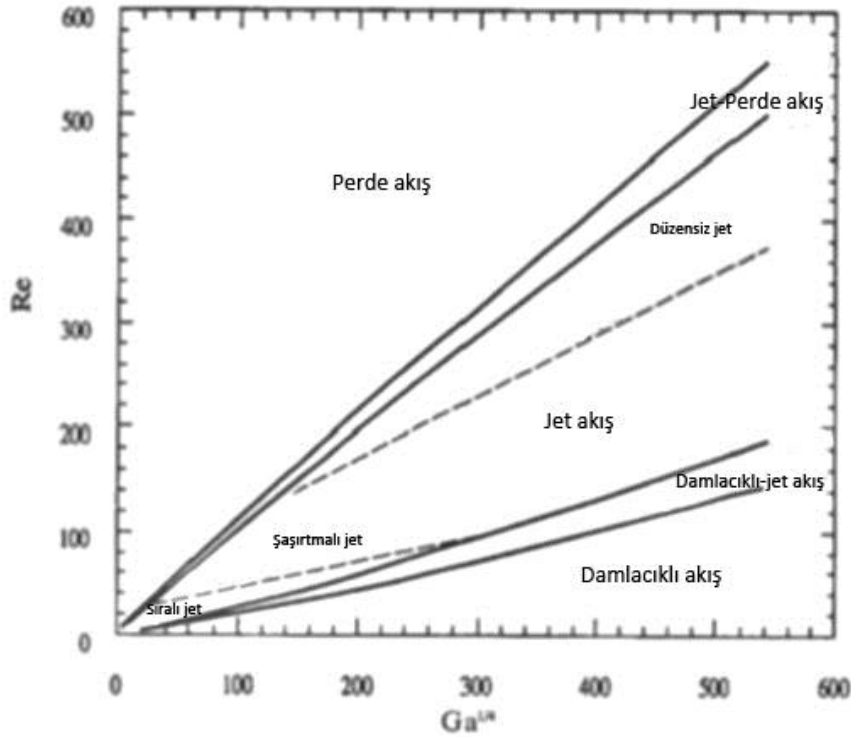
denklemleriyle belirlenmiştir. Ortalama karekök hatası değeri % 6.6’dır. Burada düşen akışkan filminin Reynolds değeri denklem 2.5 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Re_s = \frac{2\Gamma}{\mu} \quad (2.5)$$

Γ birim boyda düşen akışkanın kütleli debisi, μ ise akışkanın dinamik viskozitesidir. Modifiye edilmiş Galileo sayısı ya da Kapitza sayısı, “Ga” ile sembolize edilmektedir ve denklem 2.6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Ga = \frac{\rho\sigma^3}{\mu^4g} \quad (2.6)$$

Hu ve Jacobi [19] tarafından hazırlanan basitleştirilmiş akış haritası Şekil 2.4’de verilmiştir. Önceki çalışmalarında [8], [9] benzer akış haritaları verilmiş olmasına karşın, bu basitleştirilmiş akış haritasında geçiş histerisileri ihmal edilmiştir. Bu ihmalden dolayı ortalama kök hatası değerlerinin biraz daha yükselmesine karşın mühendislik uygulamaları için, kullanımı makul bir akış haritası çıkartılmıştır.



Şekil 2. 4 Düşen film için akış haritası [19]

2.2 Özgül Nem

Özgül nem (kg SB/kg KH), nemli hava içerisindeki su buharı kütlesinin kuru hava kütlesine oranı'dır. Su buharı kütlesi m_v (kg SB) ve kuru hava kütlesi, m_a (kg KH) ise, özgül nem denklem 2.7 yardımıyla belirlenmektedir.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.7)$$

R gaz sabitidir. Denklem 2.8 yardımıyla belirlenebilmektedir. Burada R_u universal gaz sabiti olup 8314 J/kmol.K'dir. M ise gazın molar kütlesidir.

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (2.8)$$

Hava-su buharı karışımı, ideal bir gaz olarak kabul edilmiştir. İdeal gaz hal denklemi,

$$pV = mRT \quad (2.9)$$

ifadesidir. Burada P basınç (N/m²), T mutlak sıcaklık (K), m gazın kütlesi (kg), V ise gazın hacmini (m³) belirtmektedir. İdeal gaz hal denklemini, kuru hava, su buharı ve nemli hava için ayrı ayrı uygulayabiliriz. Sırasıyla su buharı, kuru hava için ideal gaz hal denklemini ifadesi yazılacak olursa,

$$p_v V = m_v R_v T \quad (2.10)$$

$$p_a V = m_a R_a T \quad (2.11)$$

Su buharının kütlesi,

$$m_v = \frac{p_v V}{R_v T} \quad (2.12)$$

Aynı şekilde kuru havanın kütlesi,

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T} \quad (2.13)$$

Şeklinde ifade edilir. Gaz sabitleri su buharı ve kuru hava için hesaplanacak olursa,

$$R_v = \frac{R_u}{M} = \frac{8.314}{18} \quad (2.14)$$

$$R_a = \frac{R_u}{M} = \frac{8.314}{29.18} \quad (2.15)$$

Denklem 2.7 yardımıyla su buharı ve kuru havadan oluşan nemli havanın mutlak nem değeri, havanın ve su buharının kısmi basınçlarına bağlı olarak denklem 2.16 ifadesiyle belirlenebilir.

$$\omega = \frac{287 p_v}{462 p_a} \quad (2.16)$$

Atmosferik hava basıncı, kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı olarak ifade edilir.

$$p = p_v + p_a \quad (2.17)$$

Yani kuru havanın kısmi basıncı, toplam basınçla su buharının kısmi basınçları arasındaki farka eşittir. Böylece

$$\omega = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2.18)$$

ya da

$$\omega = 0.622 \frac{\varphi P_{v,d}}{p - \varphi P_{v,d}} \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Su-hava ara yüzeyinde sınır tabaka dışında ve yüzey sıcaklığında, ölçülen bağıl nem ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$\omega_y = 0.622 \frac{P_{v,d,y}}{p - P_{v,d,y}} \quad (2.20)$$

$$\omega_\infty = 0.622 \frac{\varphi_\infty P_{v,d,\infty}}{p - \varphi_\infty P_{v,d,\infty}} \quad (2.21)$$

Burada su buharının doyma basıncı sıcaklığın fonksiyonudur ve $f=P_{v,d}(T)$ şeklindeki ifade Tetens ilişkisi kullanılarak,

$$P_{v,d} = 10^{\left[\frac{7.5T}{237.5+T} + 2.7859 \right]} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{C}$) cinsinden kullanılmaktadır. Sınır tabakada sıcaklık ve derişiklik dağılımını lineer kabul ederek, sınır tabaka dışında, boru yüzeyinde ve sınır tabaka ortalama sıcaklığındaki karışımın basıncı sırasıyla,

$$P_\infty = P_{v,\infty} + P_{a,\infty} \quad (2.23)$$

$$P_y = P_{v,y} + P_{a,y} \quad (2.24)$$

$$P_f = P_{v,f} + P_{a,f} \quad (2.25)$$

Deneylerden elde edilen bağıl nem verileri kullanılarak, 2.23, 2.24, 2.25 eşitlikleri yardımıyla ortam, yüzey ve ortalama film sıcaklığındaki hava-buhar karışımında kısmi basınçlar hesaplanmıştır. Hesaplanan kısmi basınç değerleri ve ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri yardımıyla bu noktalardaki yoğunluklar belirlenmiştir.

Sınır tabaka dışında sırasıyla, su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları,

$$\rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{\frac{R_u}{M_v} (T_\infty + 273)} \quad (2.26)$$

$$\rho_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}}{\frac{R_u}{M_a} (T_\infty + 273)} \quad (2.27)$$

$$\rho_\infty = \rho_{v,\infty} + \rho_{a,\infty} \quad (2.28)$$

Yüzey sıcaklığında sırasıyla su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları,

$$\rho_{v,y} = \frac{P_{v,y}}{\frac{R_u}{M_v} (T_y + 273)} \quad (2.29)$$

$$\rho_{a,y} = \frac{P_{a,y}}{\frac{R_u}{M_a} (T_y + 273)} \quad (2.30)$$

$$\rho_y = \rho_{v,y} + \rho_{a,y} \quad (2.31)$$

Ortalama film sıcaklığında sırasıyla su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları,

$$\rho_{v,f} = \frac{P_{v,f}}{\frac{R_u}{M_v} (T_f + 273)} \quad (2.32)$$

$$\rho_{a,f} = \frac{P_{a,f}}{\frac{R_u}{M_a} (T_f + 273)} \quad (2.33)$$

$$\rho_f = \rho_{v,f} + \rho_{a,f} \quad (2.34)$$

2.3 Bağıl Nem

Havanın içerdiği su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en çok su buharı miktarına (m_d) oranı bağıl nem olarak ifade edilir ve φ ile gösterilir.

$$\varphi = \frac{m_v}{m_d} \quad (2.35)$$

Su buharı için, ideal gaz kabülü yapıldığında bağıl nem kısmi basınçlar cinsinden denklem 2.36 ile ifade edilmiştir.

$$\varphi = \frac{P_v V / R_v T}{P_{v,d} V / R_v T} = \frac{P_v}{P_{v,d}} \quad (2.36)$$

Bağıl nem kuru hava için 0, doymuş hava için 1 değerindedir. Yapılan deneysel çalışmada test hücresine giriş ve çıkış bağıl nem değerleri ölçülmüş ve mutlak nem hesaplamalarında kullanılmıştır.

MATEMATİKSEL MODEL

Tasarlanan test hücresinde eşzamanlı ısı ve kütle transferi için model oluşturulmuştur. Bu model ile düz ve yivli yatay boru üzerinden düşen su filminin ısı taşınım katsayısı, taşınım kütle geçiş katsayısı, Nu ve Sh değerleri belirlenmiştir. Aynı zamanda, besleme suyu akışı kapalı iken yapılan deneylerinde verilerinden h ve Nu değerlerinin belirlenebilmesi için model oluşturulmuştur.

3.1 Besleme Suyu Akışı Kapalı İken Yapılan Deneylerde Isı Taşınım Katsayısı ve Nu Değerlerinin Belirlenmesi

Öncelikle Newton'un soğutma kanunu ile uygun şekilde, taşınım tanımlanacak olursa ısı akısına bağlı olarak taşınım katsayısı denklem 3.1 yardımıyla tanımlanır.

$$h_k = \frac{Q_c}{A_c(T_y - T_\infty)} \quad (3.1)$$

Burada h_k test borusu üzerinden yalnızca hava akışı olduğu durumdaki ısı taşınım katsayısıdır. A_c ise akışkanla temas eden toplam yüzey alanını ifade etmektedir ve yivli boru için bilgisayarda oluşturulan model ile hesaplanmıştır. Farklı zorlanmış taşınım koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir ve veriler literatür ile karşılaştırılmıştır. Isınım ile boru yüzeyinden transfer olan ısı akısı ihmal edilerek, termodinamiğin I. kanununa göre enerji dengesi yazılmıştır.

$$Q_c = Q_h \quad (3.2)$$

Burada Q_c taşınım ile olan ısı geçişi, Q_h ise elektrikli ısıtıcı ile sisteme verilen ısı akısıdır. Denklem 3.1 ve 3.2 birlikte kullanılarak h_k ısı taşınım katsayısı denklem 3.3 ile

belirlenmiştir. Burada V, elektrikli ısıtıcıya güç kaynağından sağlanan voltaj değeri (V) ve R değeri ise boru içi ısıtıcının direnç (Ohm) değeridir.

$$h_k = \frac{V^2/R}{A_c(T_y - T_\infty)} \quad (3.3)$$

Elde edilen ısı taşınım katsayıları kullanılarak Nu değeri hesaplanmıştır.

$$Nu = \frac{h_k L_{kar}}{k_a} \quad (3.4)$$

3.2 Düşen Su Film Akışı Olması Halinde Isı Taşınım Katsayısı, Taşınım Katsayısının ve Nu, Sh Değerlerinin Belirlenmesi

Düşen su filmi farklı su debilerinde boru yüzeyinden akıtılmaktadır ve aynı zamanda farklı zorlanmış taşınım koşullarında deneyler yapılmıştır. Havanın vizkozitesi ve diğer özellikleri film sıcaklığında, buharlaşma gizli ısı (h_{fg}), yüzey sıcaklığında hesaplanmıştır. Film sıcaklığı denklem 3.5’de tanımlanmıştır.

$$T_f = \frac{T_\infty + T_y}{2} \quad (3.5)$$

Isınım ile olan ısı geçişi ihmal edilerek, test hücresi için termodinamiğin I. kanununa göre enerji dengesi yazılarak toplam ısı geçişi denklem 3.6 ile bulunur.

$$Q_t = Q_h + Q_s = Q_c + Q_b + Q_l \quad (3.6)$$

Denklem düzenlenecek olursa

$$Q_t = Q_h + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o \quad (3.7)$$

Burada i alt indisi giriş, o alt indisi çıkışı ifade etmektedir.

$$\dot{m}_o = \dot{m}_i - \dot{m}_v \quad (3.8)$$

Denklem 3.7 ile 3.8 birleştirilirse

$$Q_t = \frac{V^2}{R} + \dot{m}_l h_i - (\dot{m}_i - \dot{m}_v) h_o \quad (3.9)$$

Buharlaşan suyun debisi $\dot{m}_v$ ise denklem 3.10’daki ifadedeki yerine yazılarak Q_b belirlenmiştir.

$$Q_b = \dot{m}_v h_{fg} \quad (3.10)$$

Buharlaşıyan suyun debisi, deneysel ölçümler ile denklem 3.11 yardımıyla belirlenmiştir.

$$\dot{m}_v = V A_{th} \rho (\omega_i - \omega_o) \quad (3.11)$$

V hız (m/s), A test hücresinin akışa dik kesit alanı (m²) değeridir. Buharlaşıma ile gerçekleşen ısı geçişi denklem 3.12 ile ifade edilmiştir.

$$Q_b = V A_{th} \rho_a (\omega_i - \omega_o) h_{fg} \quad (3.12)$$

Test hücresi girişinde ve çıkışındaki mutlak nem, higrometre ile belirlenen bağıl nem ve sıcaklık ölçümlerine bağlı olarak denklem 3.13 ile hesaplanmıştır.

$$\omega = 0.622 \frac{\varphi P_d}{P - \varphi P_d} \quad (3.13)$$

Bu çalışmada üst taraftan akan su filmi ve hava arasındaki ısı ve kütle transferi eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca bu iki akış arasında oluşan toplam ısı transferi, duyulur ve gizli ısı transferi toplamıdır. Termodinamiğin I. kanununa göre enerji dengesi yeniden yazılarak taşınım ile ısı geçişi ifade edilecek olursa,

$$Q_c = Q_t - Q_b - Q_l \quad (3.14)$$

Zorlanmış taşınım koşullarında deneyler gerçekleştiğinden ışıyım ile ısı geçişi ihmal edilmiştir. Duyulur ısı transferi, su damlaları ve hava arasındaki sıcaklık farkı sebebi ile gerçekleşmektedir. “Ara yüzey” olarak tanımlanan ve su filmi yüzeyi üzerinde bulunan bölgede nem açısından doygun bir hava katmanı oluşmaktadır. Buradaki su buharının kısmi basıncı, serbest hava akımı içerisindeki su buharının kısmi buhar basıncından büyüktür. Bu sebeple “kütle transferi” gerçekleşir. Böylece, su film yüzeyinden buharlaşarak havaya transfer olan su buharı sebebi ile kütle transferi oluşur. Taşınım ile kütle geçiş katsayısı, buharlaşan su miktarından belirlenmiştir.

$$\dot{m}_v = h_m \rho_{v,f} A_c (\omega_{a,y} - \omega_{a,\infty}) \quad (3.15)$$

Ya da buharlaşan su miktarı derişiklik farkına bağlı olarak

$$\dot{m}_v = h_m A_c (\rho_{a,y} - \rho_{a,\infty}) \quad (3.16)$$

ifade edilmiştir. Chilton-Colburn eşitliğine göre;

$$h_c = h_m \rho c_p Le^{(1-n)} \quad (3.17)$$

Burada n değeri 1/3 alınabilir. Le sayısı denklem 3.18 ile belirlenmiştir.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (3.18)$$

Havanın ısı iletim katsayısı, α , μ , Pr değerleri film sıcaklığında hesaplanmıştır. D_{AB} difüzyon katsayısı ise, aşağıdaki formülasyonla hesaplanmıştır.

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} \quad (3.19)$$

Denklem 3.18 ile 3.17 birleştirilirse ısı taşınım katsayısı Chilton-Colburn eşitliğine bağlı olarak denklem 3.20 yardımıyla belirlenmiştir.

$$h_c = h_m \rho c_p \frac{\alpha}{D_{AB}}^{(2/3)} \quad (3.20)$$

Zorlanmış taşınım koşullarında, ısı transfer hızının sıcaklık farkıyla orantılı olduğu gözlenir. Newton'un soğutma kanunu ile uygun şekilde, taşınım tanımlanacak olursa ısı akısı denklem 3.21 yardımıyla tanımlanır.

$$Q_c = h_c A_c (T_s - T_\infty) \quad (3.21)$$

Elde edilen ısı taşınım katsayıları ve taşınım kütle geçiş katsayısı kullanılarak Nu değeri ve Sh değeri hesaplanmıştır. Boyutsuz Re , Pr değerleri de belirlenmiştir.

$$Nu = \frac{h L_{kar}}{k_a} \quad (3.22)$$

Prandtl sayısı film sıcaklığında Refrop 7.0 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.23)$$

Akışkanların ısı iletim katsayısı, dinamik ve kinematik viskoziteleri, buharlaşma gizli ısı gibi fiziksel özellikler Refrop 7.0 için hazırlanan kodlar yardımıyla model içerisindeki hesaplamalara entegre edilmiştir.

Reynolds değeri, hava tarafı için denklem 3.24 ile belirlenmiştir.

$$Re = \frac{V L_{kar}}{\nu} \quad (3.24)$$

Burada V hava hızı, ν akışkanın kinematik viskozitesidir. Önceden bahsedildiği üzere, viskozite değerleri bilgisayar yazılımı ile hesaplanmıştır. L ise geometrinin karakteristik uzunluğudur ve boru çapı alınmıştır. Düz boru için, düşen su filminin Reynolds sayısı önceki bölümde belirtilmişti. Yiv geometrisine bağlı olarak düşen su filminin Reynolds

sayısı belirlenmiştir. Öncelikle, düşen su filminin Reynolds sayısı denklem 3.25 eşitliği ile tanımlanmıştır.

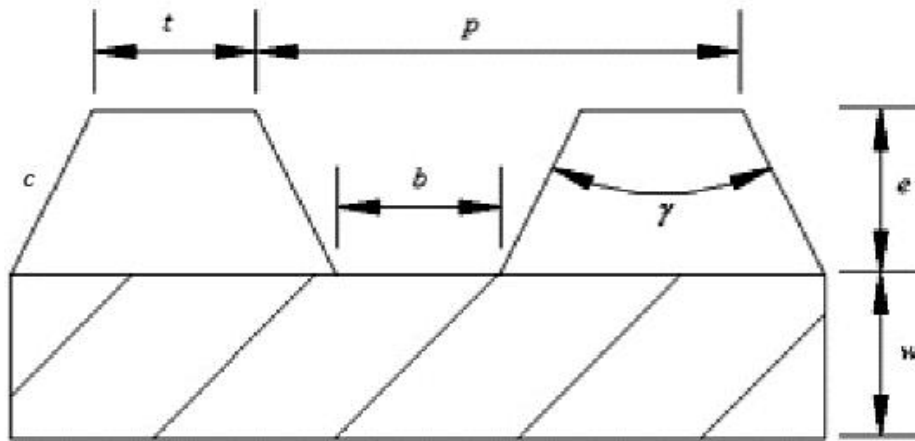
$$Re_s = \frac{V D_h}{\nu} \quad (3.25)$$

Boru dış yüzeyinden düşen su filminin hidrolik çapı belirlenecek olursa,

$$D_h = \frac{4A}{P_{islak}} \quad (3.26)$$

Hidrolik çap tanımı ile Reynolds eşitliği birleştirilerek, denklem 3.27 eşitliği elde edilir.

$$Re_{siv} = \frac{4\dot{m}_{bes}}{\mu P_{islak}} \quad (3.27)$$



Şekil 3. 1 Burgulu trapez yivli borunun özellikleri

Burgulu trapez yivli borunun geometrik özellikleri Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Yivli boru için ıslak çevre, eşitlik 3.28 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{islak} = 2 N(2c + t + b) \quad (3.28)$$

Burgulu trapez yivli borunun alanı ise eşitlik 3.29 ile hesaplanmaktadır [74].

$$A = \frac{NL}{\cos\beta} \left(b + t + \frac{2e}{\cos(\gamma/2)} \right) \quad (3.29)$$

Böylece,

$$Re_{siv} = \frac{2\dot{m}_{bes}}{\mu N (2c+t+b)} \quad (3.30)$$

olarak belirlenir. Schmidt sayısı ve Sherwood sayısı ise sırasıyla denklem 3.31 ve 3.32 ile belirlenmiştir.

$$Sc = \frac{\vartheta_a}{D_{AB}} \quad (3.31)$$

$$Sh = \frac{h_m L_{kar}}{D_{AB}} \quad (3.32)$$

Burada belirlenen taşınım ile kütle geçiş katsayısı ve denklem 3.16 ile belirlenen D_{AB} difüzyon katsayısı denklem 3.32'de birleştirilerek, her bir durum için Sh sayısı belirlenmektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel olarak kurulumu tamamlanan düzenek hakkında bilgi verildikten sonra yapılan deneysel çalışmaların sonuçları paylaşılmıştır. Deneylerde kullanılan cihazların tanımlanması ve bilgilendirmesi yapıldıktan sonra her bir deneyde kullanılan işlem sırasından bahsedilmiştir. Sonrasında ise hava hızına, besleme suyu debisine, boyutsuz Re_s , Re_a gibi sayısal parametrelere bağlı olarak Nu , h_m , h_c , Nu_{ff} gibi değerlerin değişimi incelenmiştir. Aynı şekilde akış karakteristiğine bağlı olarak da bu parametrelerin değişimi ifade edilmiştir. Sayısal görüntü işleme metotları araştırılmış ve deney düzeneğinde yapılan görüntülemeler üzerinde bu metotlar uygulanarak ıslak yüzey alan yüzdesi belirlenmiştir. MATLAB programı görüntü işleme araç çubuğu kullanılarak farklı geometrili yivlere sahip borular için görüntü işleme analizi yapılarak, sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1 Deney Tesisatı ve Test Hücresi

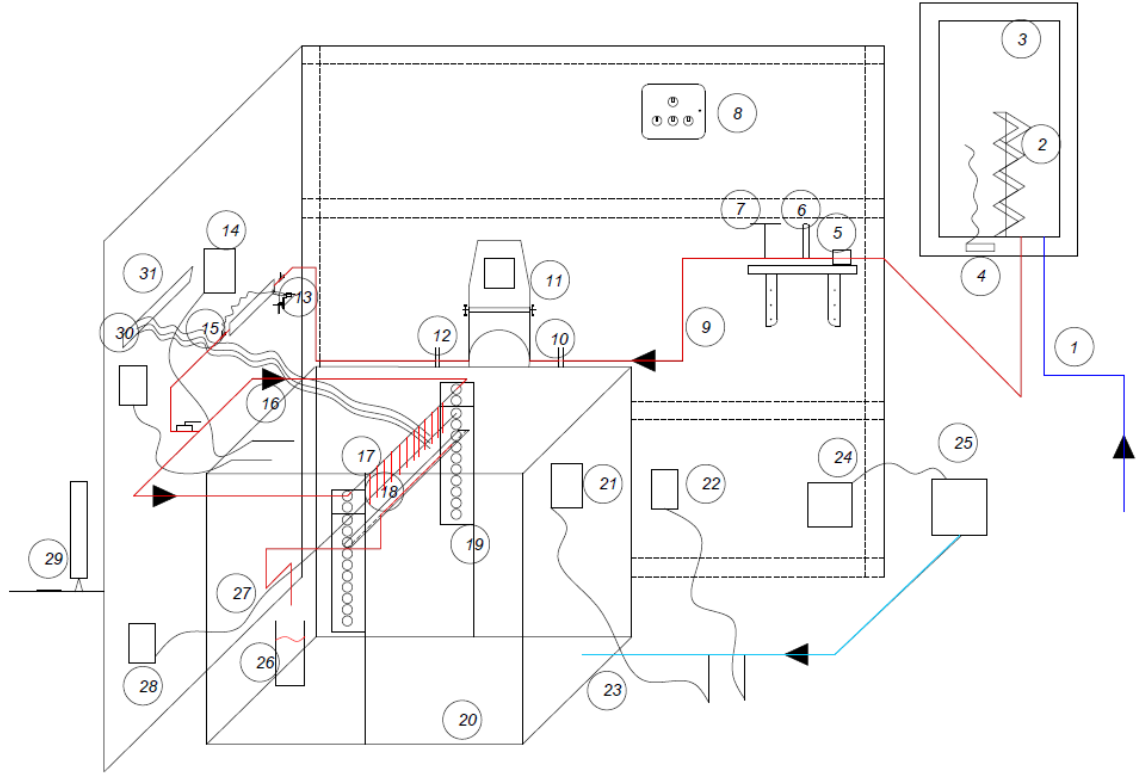
Deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney sisteminde ölçü ekipmanları olarak, sıcaklık ölçerler, anemometreler, debimetreler ve frekans değiştirici kullanılmıştır. Sistemde ayrıca ısıtıcı elemanlar, test kabini, besleyici ünitesi, radyal fan ve hava kanalı, güç kaynağı, PID kontrol ünitesi, çok kanallı veri kaydedici bulunmaktadır.

4.1.1 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri ve Ekipmanları

Tesisat üzerinde, test hücresinde ve test borusu üzerinde çeşitli noktalara yerleştirilen ölçerler vasıtasıyla ölçümler gerçekleştirilmektedir.

4.1.1.1 Higrometre

Test hücresinin alt girişinde bulunan hava kanalı girişine ve test hücresinin üst çıkışına yerleştirilen 2 adet higrometre yerleştirilmiştir. Higrometreler yardımıyla test hücresi içerisindeki bağıl nem değişimi hem cihaz ekranından belirlenebildiği gibi hemde analog voltaj sinyal çıkışı kullanılarak veri kaydedicinin terminal ünitesine anlık olarak bildirilmektedir (Şekil 4.2).



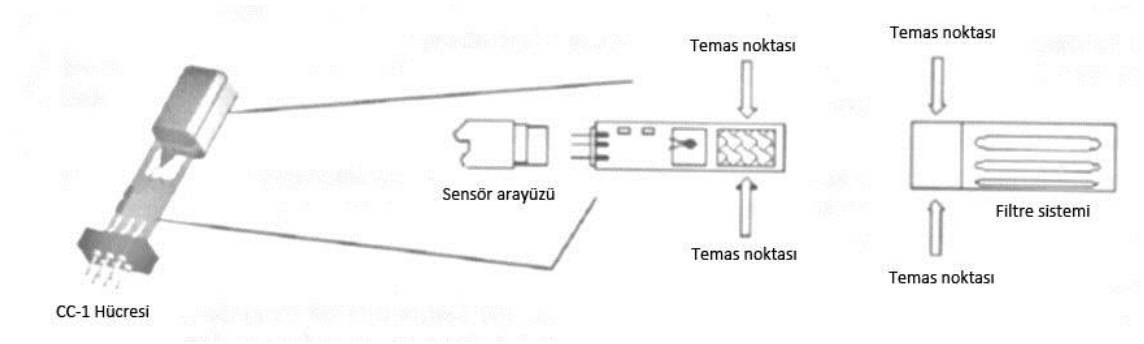
- | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1) Şebeke suyu girişi | 12) Sensoprom kontrol ünitesi | 23) Test hücresi havalandırma hattı |
| 2) Elektrikli rezistans | 13) Su sıcaklık sensörü | 24) Frekans ayarlayıcı |
| 3) Su ısıtıcısı | 14) Anemometre (Test hücresi çıkışı) | 25) Fan |
| 4) Termostat | 15) Pt100 | 26) Besleme suyu çıkışı |
| 5) Filtre | 16) Termoelemanlar | 27) Boru içi elektrikli ısıtıcı |
| 6) Kontrol vanası | 17) Besleyici boru | 28) Güç kaynağı |
| 7) İğne vana | 18) Test borusu | 29) Bilgisayar |
| 8) Elektrik panosu | 19) Kestamid bloklar | 30) Higrometre (Test hücresi çıkışı) |
| 9) Besleme suyu hattı | 20) Test hücresi | 31) Veri kaydedici / Terminal |
| 10) Bağlantı flanşları | 21) Anemometre (Test hücresi girişi) | |
| 11) Elektromanyetik debimetre | 22) Higrometre (Test hücresi girişi) | |

Şekil 4. 1 Deney sisteminin şematik gösterimi



Şekil 4. 2 Higrometrelerin gösterge paneli ve probu

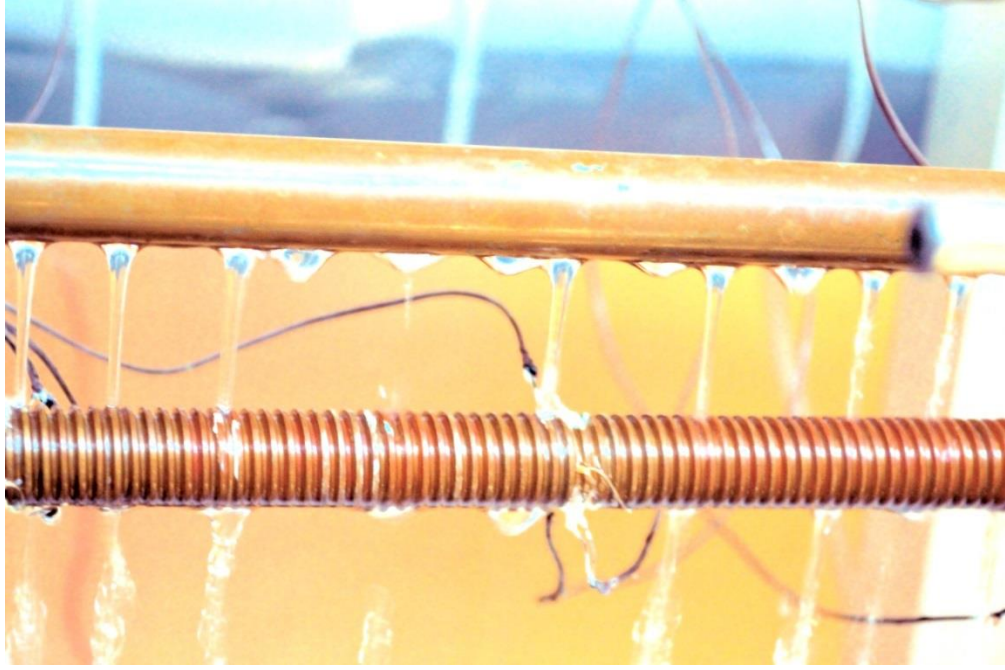
Novasina marka Hygrodat 100 model higrometrelerin nem ölçüm aralığı %6 ile %100 arasındadır ve doymaya karşı elektronik korumalıdır. Higrometrenin kuru termometre sıcaklığı ölçüm aralığı -20°C ile 80°C arasında, çığ noktası ölçüm aralığı ise -40°C ile 60°C arasındadır. Higrometrenin Novasina marka ETC 7420 model nem sensörünün doğruluğu $\pm 0.5\%$ bağıl nemdir, sıcaklık sensörünün ise 0°C ile 70°C arasında doğruluk değeri $\pm 0.1\text{K}$ 'dir. Deney tesisatında kullanılan higrometrelerin problarının temas yüzeyleri ve çalışma prensibi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 Deney tesisatında kullanılan higrometrelerin çalışma prensibi

4.1.1.2 Termoelemanlar

Termoelemanlar yaklaşık 1.5 metre boyundadır ve T tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Termoelemanlar öncelikle dairesel olarak iplik geçirilerek sabitlendikten sonra yüzeyine ısı pastası uygulanmıştır (Şekil 4.4). Termoelemanların doğruluğu $\pm 0.5\text{K}$ 'dir.



Şekil 4. 4 Deney tesisatında kullanılan termoelemanların bağlantısı

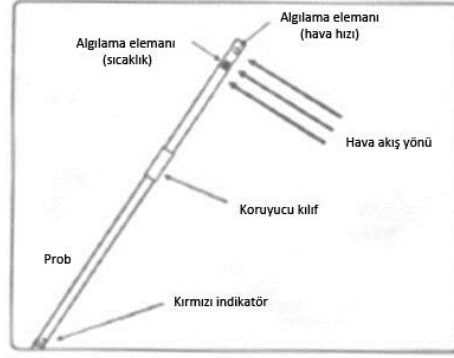
4.1.1.3 Anemometre

Higrometreler gibi anemometreler de test hücresi girişindeki hava kanalına ve test hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 4.5’de görülen sıcak tel tipi hava hızı ölçerler tercih edilmiştir. Test hücresi içerisinde ki ortalama hava hızı belirlenerek, zorlanmış taşınım koşullarında gerçekleştirilen deneylerde kullanılmak üzere test periyodu boyunca kayıt altına alınmaktadır. Aynı zamanda anemometre ve higrometreler ile ortam havası sıcaklığı, test hücresi giriş sıcaklığı ve test hücresi sıcaklığı da belirlenmektedir.



Şekil 4. 5 Deney tesisatında kullanılan anemometreler

Kimo marka Ctv 200 sıcak tel tipi hız ve sıcaklık ölçerin doğruluğu ± 0.03 m/s 'dir. Cihazın hız ölçme aralığı 0.1 ile 10 m/s arasında ve sıcaklık ölçme aralığı ise 0 °C'den 60°C'ye kadardır. Şekil 4.6'da gösterilen cihaz üzerindeki kırmızı nokta akışa karşı yerleştirilmiştir ve koruyucu kapak çıkartılarak hem dijital göstergeden hemde test periyodu boyunca bilgisayardan veri alınması sağlanmıştır.



Şekil 4. 6 Deney tesisatında kullanılan anemometrelerin kullanım şeması

4.1.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanları

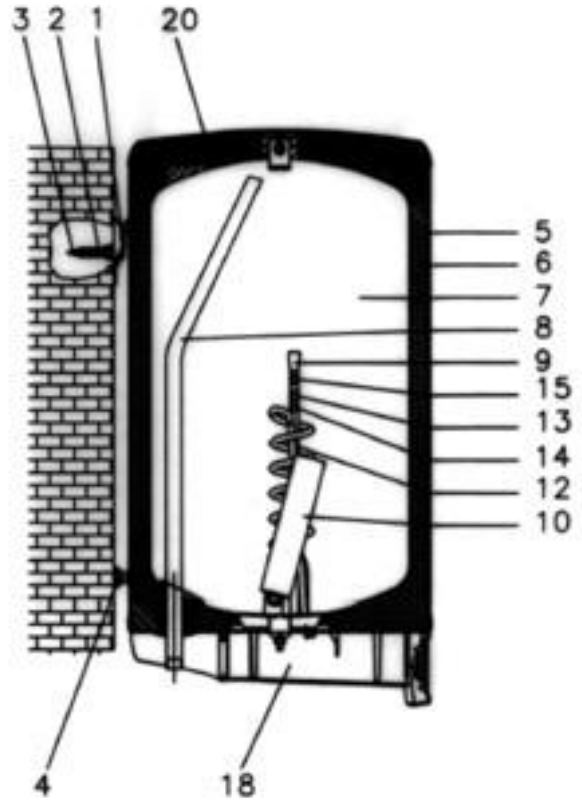
4.1.2.1 Tesisat Ekipmanları

Depolu sıcak su ısıtıcısı çıkışına filtre yerleştirilmiştir. Hemen sonrasında deneylerde debi kontrolünün sağlanması için 1 adet kontrol vanası, düşük debilerde sistem debisinin ayarlanması için ise 1 adet iğne vana yerleştirilmiştir.

4.1.2.2 Depolu Sıcak Su Isıtıcısı

Besleme suyunun deney süresi boyunca sabit sıcaklıkta olmasını sağlamak için deney düzeneğine kurulan su ısıtıcısının gücü 1980 W 'dır. Şekil 4.7'de depolu sıcak su ısıtıcısı ve ekipmanları gösterilmiştir. 50 lt su kapasiteli olan depo yardımıyla deney süresince sabit sıcaklıkta besleme suyu sağlanmaktadır. Suyun sıcaklığı, dijital termostat ile belirlenmektedir ve deney şartlarında su sıcaklığı sağlandıktan sonra kontrol ya da iğne vanası yardımıyla sisteme su girişi başlatılmaktadır. Termostatın doğruluğu $\pm 0.5K$ 'dir. Maksimum işletme basıncı 10 bar olan ısıtıcının ısı izolasyonu monoblok poliüretandır. 24 saatlik ısı kaybı 0.9 kWh'dir ve depo suyunun yeniden 50 °C sıcaklığa ısıtılma süresi 110 dakikadır.

1. Askı braketi
2. Dübel
3. Civata + Rondela
4. Tampon plastiği
5. Dış gövde
6. Monoblok Poliüretan
7. İç kazan
8. Sıcak su borusu
9. Bulp borusu
10. Magnezyum anod
11. Soğuk su borusu
12. Rezistans
13. Termostat kapileri ucu
14. Emniyet termostatı kapileri ucu
15. Digital termostat duyucu ucu
16. Digital termostat yukarı/aşağı tuşları
17. Şalter
18. Alt plastik
19. Rezistans uyarı ışığı
20. Üst plastik
21. Emniyet ventili
22. Digital gösterge



Şekil 4. 7 Depolu su ısıtıcısının şematik resmi ve ekipmanları

4.1.2.3 Test Hücresi

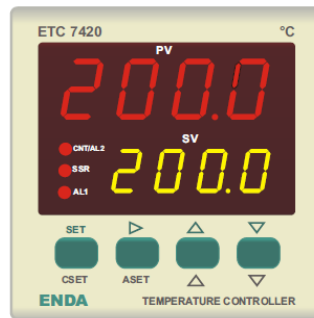
Test hücresi içerisinde, test borusu, bağlantı elemanları, anemometreler, higrometreler, termoelemanlar, besleyici, toplama haznesi, akış düzenleyici bulunmaktadır. Besleyici borusuna giren şartlandırılmış su öncelikle test borusuna akmaktadır. Test borusunun yanal yüzeylerinden süzülen su akışı, sonrasında ise test hücresi altında bulunan toplayıcı ile havuza gönderilmektedir. Toplayıcı hattına yerleştirilen debimetre ile de giden suyun debisi ölçülmektedir. Şekil 4.8’de görülen düşen film tipi akış oluşturulmuştur. Saf bakır düz boru üzerine 1 mm çapında 1.5 mm aralıklı delikler açılarak yaptırılan besleyici borunun toplam boyu 40 cm’dir.



Şekil 4. 8 Besleyici boru ünitesi ve düşen film tipi akış

4.1.2.4 PID Kontrol Ünitesi

Sistemde kullanılmakta olan sıcak suyun şartlandırılmasının kontrolü için kablo tipi ısıtıcı ile birlikte çalışan 1 adet PID sıcaklık kontrol cihazının kullanılması tercih edilmiştir (Şekil 4.9). Enda marka ETC 7420, PID kontrol formülü, dijital universal kontrol cihazının çift display ekranı sayesinde ayarlanan değer ve proses değeri aynı anda izlenebilmektedir. Kontrol ünitesinin doğruluğu $\pm 0.2\%$ 'dir. Seçilebilir 0-20 mA, 4-20 mA, SSR ya da röle çıkışı bulunan cihazda RS485 opsiyonel modülü sayesinde ModBus RTU protokolü ile veri aktarılabilmekte ve kontrol edilebilmektedir.

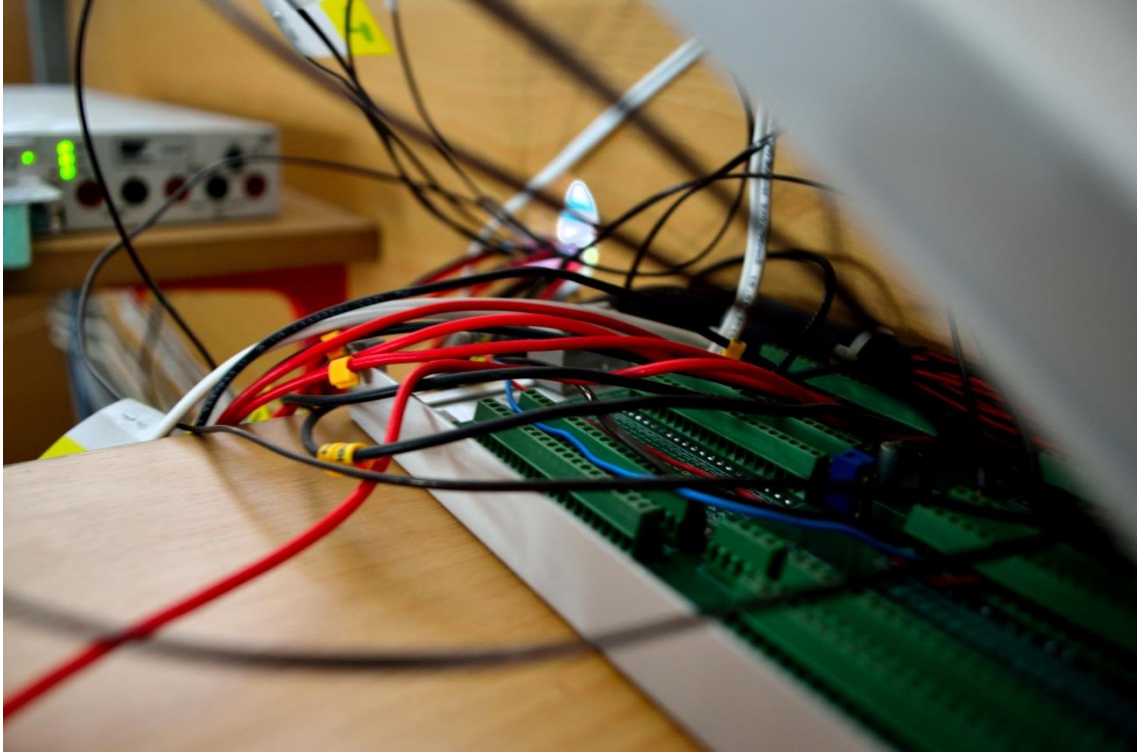


Şekil 4. 9 Kontrol ünitesinin bilgilendirme ekranı

4.1.2.5 Veri Kaydedici

Deney tesisatındaki verilerin anlık olarak takip edilmesi ve kaydedilmesi için VTI marka EX1200, yüksek yoğunluklu çoklayıcı ile birlikte kullanılmıştır. Bu çoklayıcı, toplam 96 kanala kadar desteklemektedir. Her bir kanal maksimum 100V ya da 1 amper

desteklemektedir. Bilgisayar ile ana terminal bağlantısı ethernet kablosu ile LAN üzerinden gerçekleştirilmiştir. DAC express yazılımında hazırlanan program ile tüm verilerin anlık olarak akışı izlenmiştir ve aynı zamanda kaydedilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4. 10 Veri kaydedici ile verilerin anlık olarak bilgisayardan izlenmesi

4.1.2.6 Debimetre

Tesisat üzerinde toplam 2 adet debimetre kullanılmaktadır. Test hücresi içerisinde yer alan besleyici boru ünitesine gelen suyun debisi Şekil 4.11’de gösterilen elektromanyetik debimetre aracılığıyla ölçülmektedir. Elektromanyetik debimetre sensörü ile kontrol ünitesinin bağlantısı Sensorprom adı verilen ünite ile gerçekleştirilmektedir. Dahili ve harici olarak monte edilebilen Mag 5000 transmitter kontrol ünitesinin cihaz ile birlikte montajı gerçekleştirilmiştir ve ayrıca 4-20 mA çıkışı kullanılarak verilerin anlık olarak bilgisayarda depolanması sağlanmıştır. Siemens marka Magflo Mag1100F model elektromanyetik debimetrenin doğruluğu % 0.2’dir. Maksimum çalışma basıncı 40 bar, cihazın çalışma sıcaklığı aralığı ise -40 C’den 100°C’e kadardır.

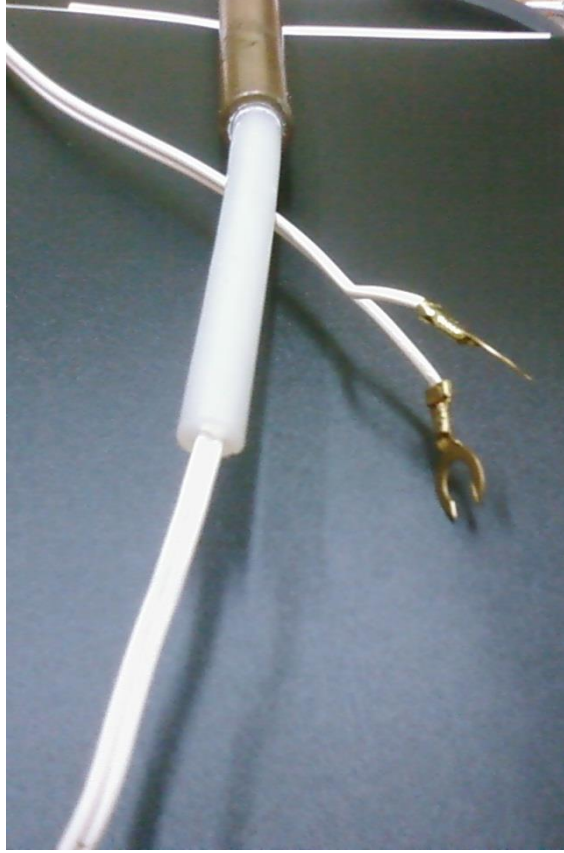


Şekil 4. 11 Besleme suyu debisini belirlemek için kullanılan elektromanyetik debimetre

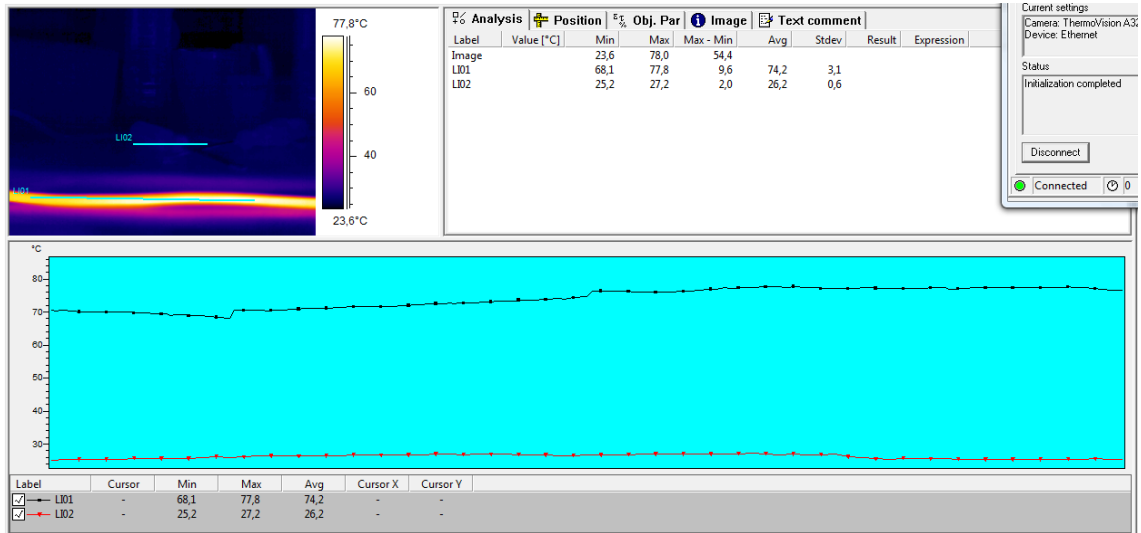
4.1.2.7 Boru İçi Isıtıcı

Farklı geometrilere sahip borular için özel olarak imal edilmiştir. İçerisindeki ısıtıcı rezistansının direnci 2.97 kOhm'dur ve ısıtıcı boyu 34 cm'dir. Isıtıcının toplam çapı ($\emptyset$) 12 mm 'dir ve 2 m uzunluktaki bağlantı kablolarıyla güç kaynağına bağlanmıştır. Silikon kaplı ısıtıcı rezistans yivli ve referans düz boru için özel olarak imal edilmiştir ve boru içerisinde ürettirilerek hava boşluğu kalmasının önüne geçilmiştir (Şekil 4.12). Boru içi ısıtıcının doğruluğu $\pm \% 0.01$ 'dir. Boru içi ısıtıcısı ile test borusu boyunca sıcaklık dağılımının eksenel ve çevresel olarak homojen olması sağlanmıştır. Flir marka A320 model termal kamera ile yapılan görüntülemeler ile yüzey sıcaklığının sabit olduğu ve homojen bir dağılım olduğu tespit edilmiştir. Yivli boru içerisine yerleştirilmiş ısıtıcının çalıştırılması ile yüzey sıcaklığının değişimi Şekil 4.13'de görülmektedir. Aynı boru içi ısıtıcılardan düz boru için üretilenin yüzey sıcaklık değişim grafiği ise Şekil 4.14'de görülebilmektedir. Bu ölçümler ayrı bir hacimde doğal taşınım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Düz bir yüzey üzerinde kaidelere yerleştirilen ısıtıcı eleman yüzey ile temas ettiğinden bir miktar ısı kaybı gerçekleşmiştir. Burada test edilen eksenel

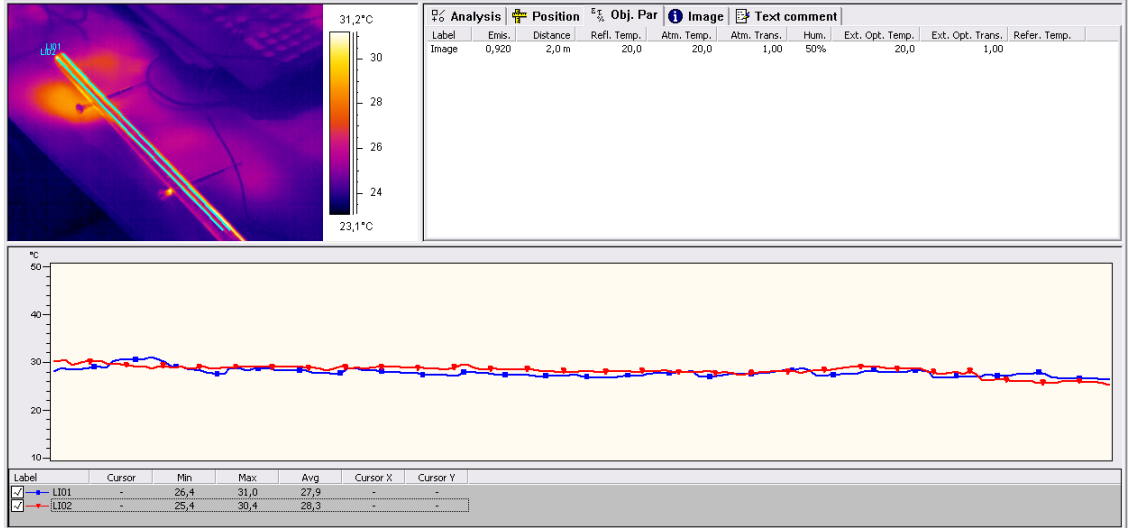
olarak sıcaklık dağılımı olduğundan “L01” eğrisi boyunca sıcaklık değerleri okunmuştur ve homojen bir dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 12 Boru içi özel ısıtıcının boru içerisine montajı



Şekil 4. 13 Yivli boru içi ısıtıcısının termal kamera ile görüntülenmesi ve sıcaklık değişim grafiği



Şekil 4. 14 Referans düz boru içi ısıtıcısının termal kamera ile görüntülenmesi ve sıcaklık değişim grafiği

4.1.2.8 Görüntüleme Cihazı

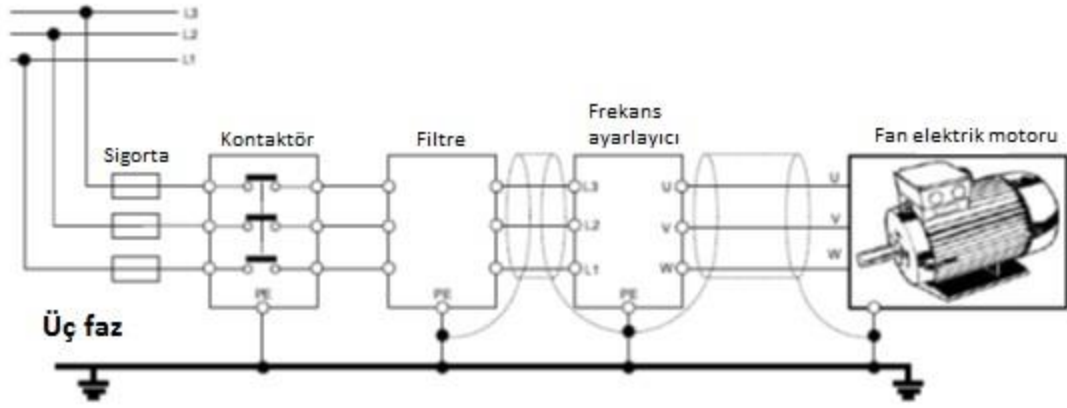
Akışın görüntülenmesi ve yüzey ıslaklık alanının belirlenmesi için yüksek hızlı kamera tercih edilmiştir. Görüntüleme cihazı olarak kullanılan Casio marka Exilim Pro F1 model dijital fotoğraf makinesinde yüksek hıza sahip yeni bir CMOS görüntü algılayıcı vardır. Ayrıca yüksek hız sağlayan LSI görüntü işlemcisi bulunmaktadır. Seri çekim özelliğinin yanında, "Prerecord" olarak adlandırılan özelliği kullanılarak, deklanşöre basma anından önce de seri çekim hızında görüntüleme yapılmıştır. Tam çözünürlükte saniyede 60 kare çekim hızına sahiptir. Çekim aşamasında deklanşöre tam olarak basılmasına gerek kalmadan fotoğraflar kameranın tampon belleğine saniyede 60 kare hızda kaydedilebilmiştir. Görüntüleme cihazı ile flaş kullanarak yapılan çekimlerde saniyede 7 kare hız ile 20 adet çekim yapmak da mümkün olmuştur. Düşen film tipi akışta, jet tipi akışın görüntülediği bir fotoğraf Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 15 Görüntüleme cihazı ile akışın görüntülenmesi

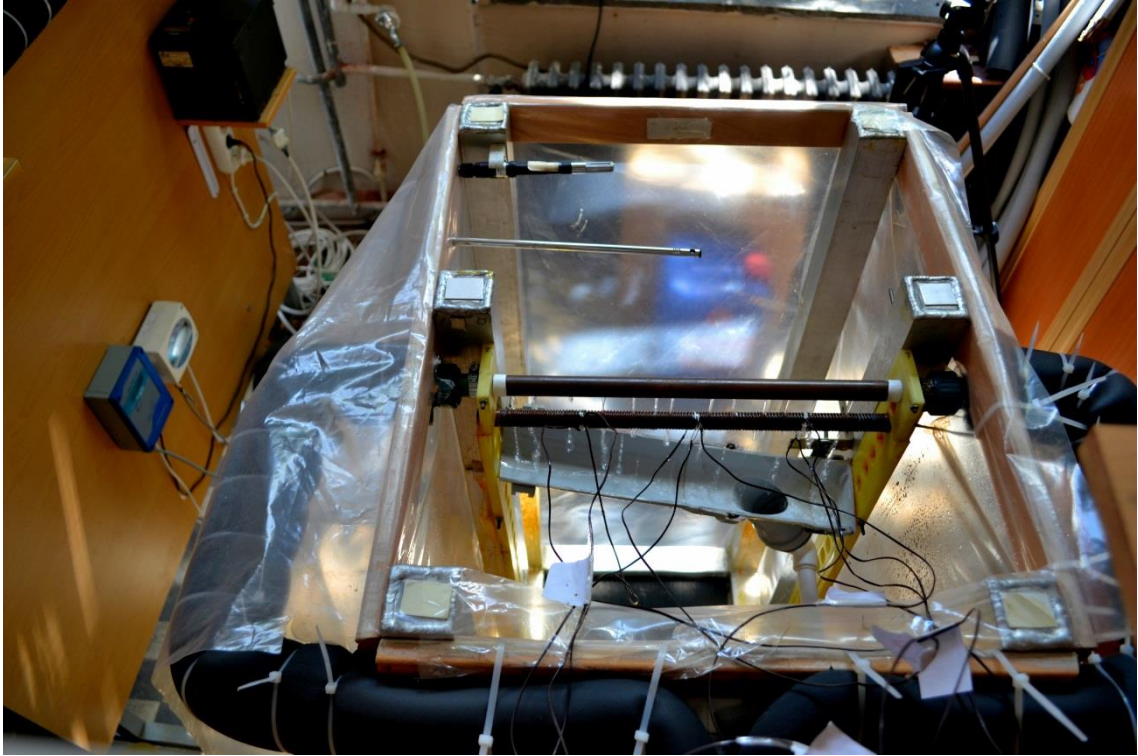
4.1.2.9 Frekans Ayarlayıcı

Deney tesisatında havalandırma kanalında kullanılan fanın kontrolünü sağlamak için Siemens marka Micromaster 420 model frekans ayarlayıcı kullanılmaktadır. Monofaze 220V AC giriş, Trifaze 220V AC çıkış gerilimine sahiptir ve 0.12 kW – 2.2 kW aralığındaki elektrik motorlarında kullanılabilir. Deney tesisatında kullanılan radyal fanın elektrik motoruna Şekil 4.16'da gösterilen elektrik şemasına göre, güç besleme bağlantıları yapılmıştır. Frekans ayarlayıcı, kullanıcı operatör menüsünden çalıştırıldıktan sonra istenilen Hertz (Hz) değerine ayar yapılarak, test hücresi hava debisi kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4. 16 Frekans ayarlayıcısının, fanın elektrik motoruna bağlantı şeması ve güç besleme bağlantıları

Deney tesisatında kullanılan ölçü aletlerinin ve cihazların sisteme entegrasyonu sonrasında yalnızca test hücresinin görünüşü Şekil 4.17'deki gibidir.



Şekil 4. 17 Deney tesisatı

4.2 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Metodu

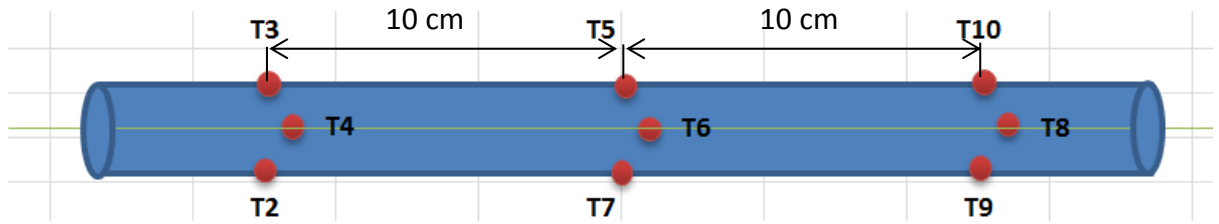
Hem zorlanmış taşınım şartlarında yivli boru ile gerçekleştirilen hemde referans düz boru ile gerçekleştirilen tüm deneylerde izlenen işlem sırası aşağıdaki gibidir:

1. Sistemde bulunan besleme suyu ısıtıcısı çalıştırılır ve sabit depo sıcaklığına ulaşıncaya kadar beklenir.
2. Sistem hatlarında mevcut suyun dışarı tahliyesi ve şartlandırılmış suyun hat içerisinde beklemesi için küresel vana açılır, kısa sürelik bir periyod sonrasında kapatılır.
3. Havalandırma fanı çalıştırılır ve frekans konvertörü istenilen Hertz değerine ayarlanır.
4. Boru içi elektrikli ısıtıcısı çalıştırılır ve istenilen yüzey sıcaklığına ulaşması için gerekli voltaj değeri güç kaynağına girilir.
5. Veri kaydedicisi ile toplanan boru yüzey sıcaklıkları ve grafikleri kontrol edilerek, yüzey sıcaklığının besleme suyu sıcaklığı ile eş değeri olması sağlanır.
6. Deney planında belirlenen debi değeri için, iğne vana ile istenilene değere ayarlanan su debisinin test hücresinde akışı sağlanır.
7. Kontrol grafikleri takip edilerek, sistemin rejime girmesi sağlanır.
8. Veri kaydedici, besleme suyu sıcaklığı deney şartlarında iken kayıt almaya başlatılmaktadır ve 30 dakikalık bir periyotta saniyelik ölçümleri kayıt altına almaktadır.
9. Multimetre ile güç kaynağı çıkışından paralel olarak voltaj değerleri belirlenmektedir.
10. Gerekli dönüşümlerin, kalibrasyon eğrilerinin uygulanması sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınır.

4.3 Termoelemanların Yerleştirilmesi

Test borusu boyunca onuncu santimetreye, yirminci santimetreye ve otuzuncu santimetreye olmak üzere 3 noktadan ve çevresel olarak 3 noktadan toplam 9 noktada ölçüm alınmaktadır. Şekil 4.18’de test borusu üzerinde ölçüm alınan noktalar şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan 9 termoelemandan eksenel olanlarının ortalaması boru üst yüzey sıcaklığının, boru yan yüzey sıcaklığının ve boru alt yüzey

sıcaklığının tespit edilmesine yardımcı olmaktadır. Test borusu hakkında detaylı teknik bilgi Ek C’de verilmiştir.



Şekil 4. 18 Deney setindeki termoelemanların dizilim şeması

4.3.1 Termoelemanların Kalibrasyonu

Yüzeyi yivli ve düz boruların deneylerinde kullanılmak üzere 10 adet termoeleman (T Tipi) veri kaydediciye bağlandıktan sonra kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Referans kalibratör olarak Fluke 54 II çift girişli dijital termometre kullanılmıştır. 0 °C sabit su havuzu oluşturulmuş ve her bir termoeleman ile ölçüm alınmıştır. 100 °C sıcaklığa kadar bu ölçümler tekrarlanmıştır ve kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.19’da veri toplama yazılımı içerisine girilen kalibrasyon fonksiyonları yer almaktadır.

Untitled.dxp - DAC Express Data Acquisition/Recorder

File Edit Channels View Instrument Help

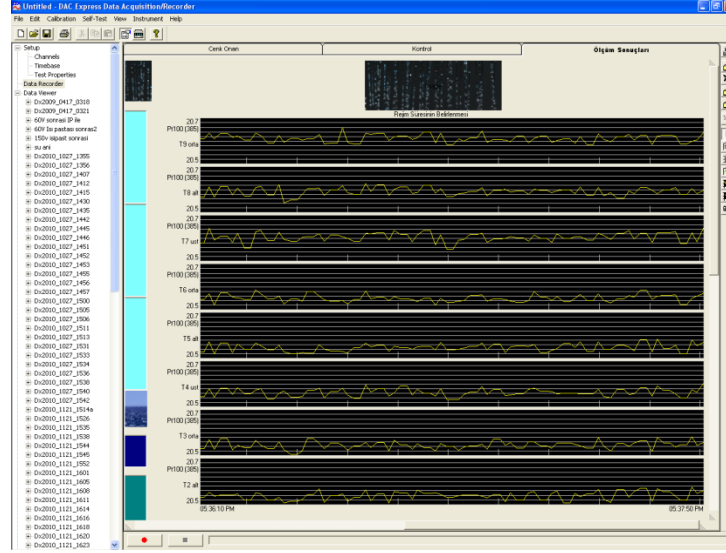
Channels
Timebase
Test Properties
Data Recorder
Data Viewer
Dx2011_0405_1313a
Dx2011_0405_1433
Dx2011_0405_1714a
Related Documents

48 virtual calculated channels

ID	Enable	Name	Formula/Variables	EU	Limit.Event
110:3001	☐		0	...	Above Limit
110:3002	☒	T2 alt	$-2*10^{(-0.7)^3}+0.0002*2^2+0.9704*2+0$	...	Above Limit
110:3003	☒	T3 orta	$-9*10^{(-0.6)^3}+0.0002*3^2+0.9712*3+0$	...	Above Limit
110:3004	☒	T4 ust	$3*10^{(-0.7)^3}+0.0001*4^2+0.9733*4+0$	...	Above Limit
110:3005	☒	T5 alt	$-4*10^{(-0.7)^3}+0.0002*5^2+0.9686*5+0$	...	Above Limit
110:3006	☒	T6 orta	$-4*10^{(-0.7)^3}+0.0002*6^2+0.9714*6+0$	...	Above Limit
110:3007	☒	T7 ust	$1*10^{(-0.6)^3}+3*10^{(-0.5)^3}+7*2+0.9789*7$	...	Above Limit
110:3008	☒	T8 alt	$1*10^{(-0.5)^3}+8*3+1*10^{(-0.5)^3}+8*2+0.9786*8$	...	Above Limit
110:3009	☒	T9 orta	$7*10^{(-0.7)^3}+9*3+8*10^{(-0.5)^3}+9*2+0.9736*9$	...	Above Limit
110:3010	☒	T10 ust	$1*10^{(-0.6)^3}+10*3+5*10^{(-0.5)^3}+10*2+0.9763*$	...	Above Limit
110:3011	☒	T11 env	$1*10^{(-0.5)^3}+11*3+2*10^{(-0.5)^3}+11*2+0.979*$	...	Above Limit

Şekil 4. 19 Yazılım içerisindeki kalibrasyon şeması

9 termoeleman ile sabit yüzey sıcaklığı boru içi ısıtıcısı kapalı iken 20.6 °C olarak belirlenmektedir ve ± 0.1 °C sapma görülmektedir. Şekil 4.20’de yazılım ekranı ve alınan ölçüm sonuçlarının zamana bağlı grafikleri görülmektedir. Kalibrasyon değerleri ve fonksiyonları her bir termoeleman için Ek B’ de belirtilmiştir.

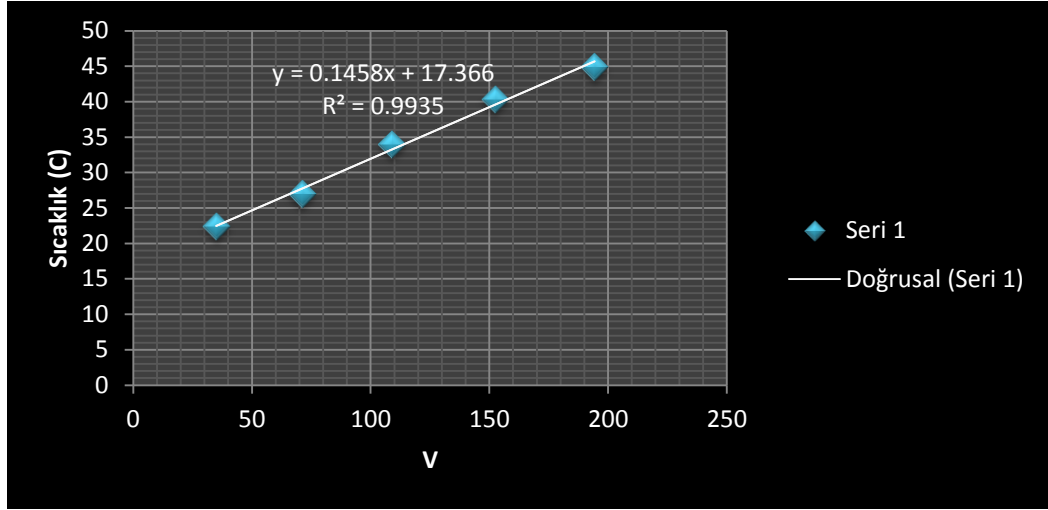


Şekil 4. 20 Isıtıcı kapalı konumda iken, sabit yüzey sıcaklığı 20.6 °C (± 0.1 °C sapma ile)

4.4 Deneylerin Yapılışı

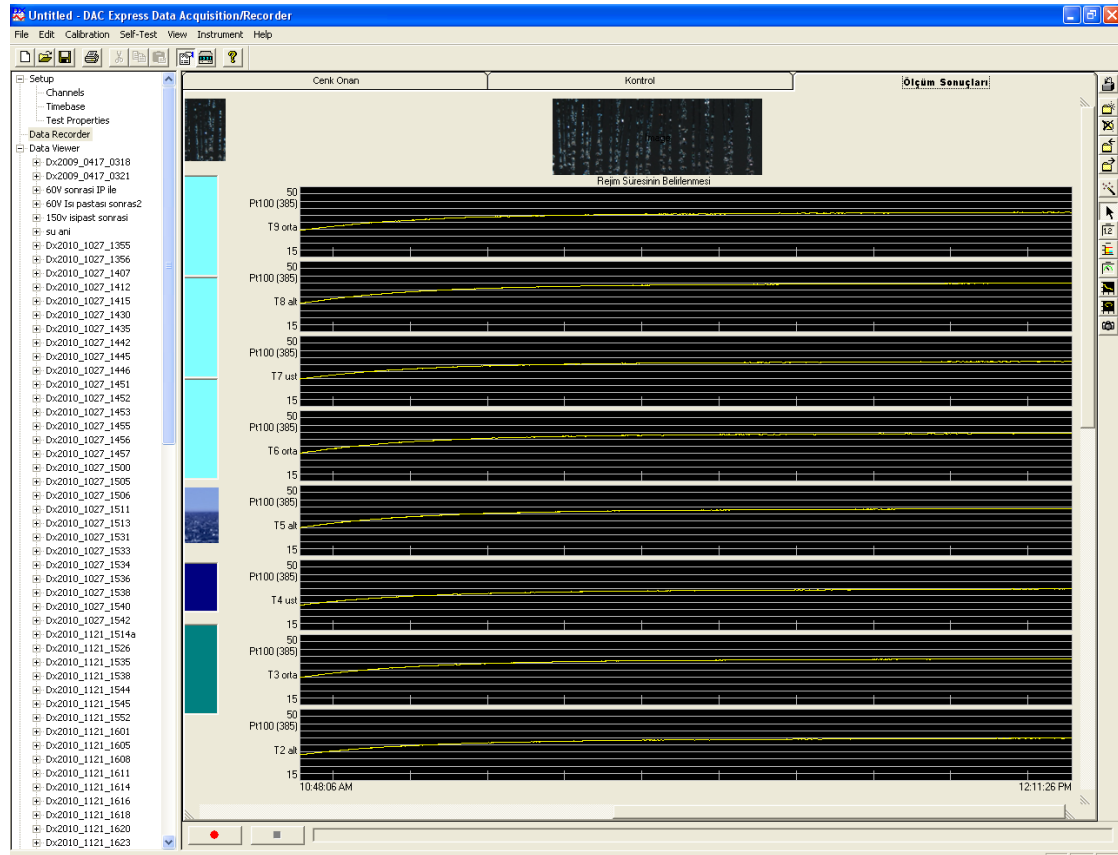
Tüm deneylerde belirtilen besleme suyu sıcaklığı ile eşit, boru yüzey sıcaklığı elde edildikten sonra deneye başlanmıştır. Boru yüzey sıcaklığı homojen sıcaklık dağılımının sağlandığı silikon kaplı elektrikli ısıtıcı ile sağlanmaktadır. Multimetre ile boru içi ısıtıcısına bağlı güç kaynağından ölçülen voltaj değerleri her deney için kayıt altına alınmaktadır. Boru içi ısıtıcısının gücü istenilen deney şartları için değiştiğinden öncelikle su akışı başlamadan farklı voltaj değerlerinde elde edilen sıcaklık değerleri belirlenmiştir ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Her bir deneyde kullanılacak olan ısıtıcı gücünün belirlenmesi içinde Şekil 4.21’de belirtilen doğru denklemi kullanılmaktadır. Veri kaydedici ile kayıt altına alınan değerler aşağıda belirtilmiştir.

- Besleme suyu sıcaklığı
- 9 noktadan alınan boru dış yüzey sıcaklığı
- Test hücresi içerisindeki hava hızı (4-20 mA)
- Test hücresi giriş sıcaklığı (0-10 V) ve bağıl nemi (0-10 V)
- Test hücresi çıkış sıcaklığı (0-10 V) ve bağıl nemi (0-10 V)
- Ortam sıcaklığı
- Debimetre sensöründen alınan ölçüm değerleri (4-20 mA)

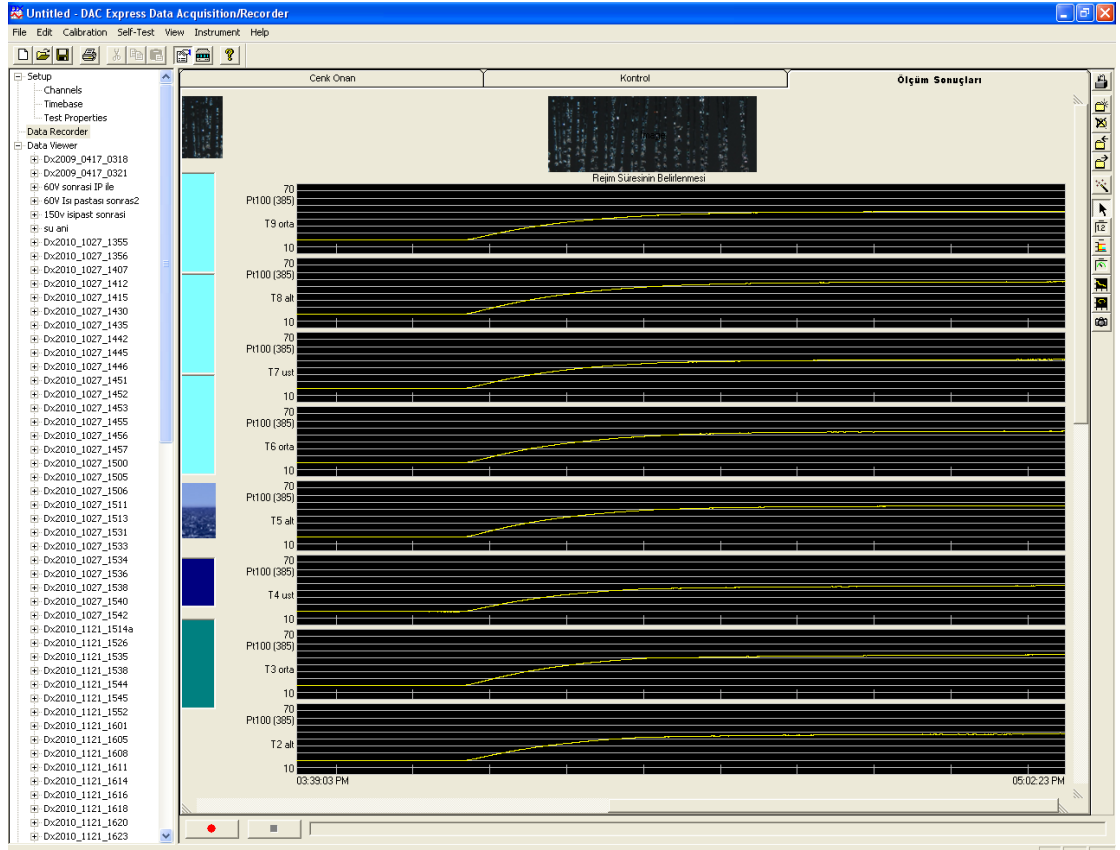


Şekil 4. 21 Voltaj değerlerinin zorlanmış taşınım koşullarında ayarlanması

Yüzey sıcaklığının rejime girmesinden sonra deneylere başlanmaktadır. Bunun takibi için program içerisine yazılmış olan grafikler takip edilmektedir. Deney esnasında ölçülen yüzey sıcaklıklarının her bir termoeleman için sabitlenmesi beklenmektedir ve örnek grafikleri Şekil 4.22’de ve Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



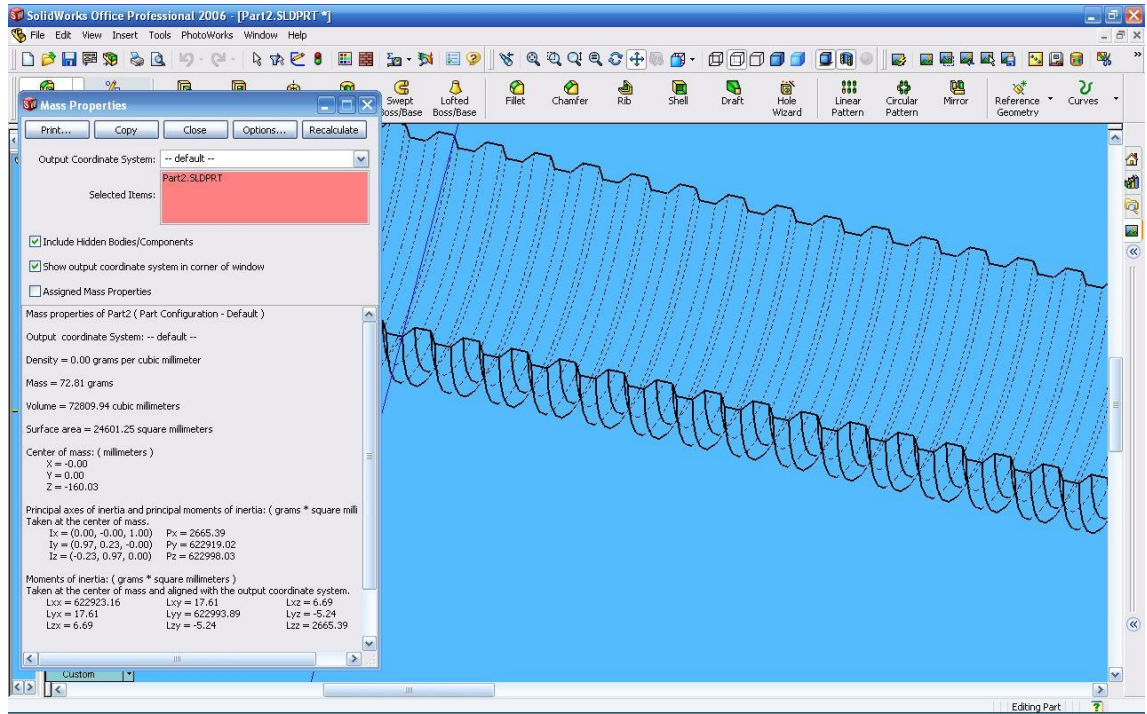
Şekil 4. 22 Yüzey sıcaklığının sabit değerde tutulması için elektrikli ısıtıcının ayarlanması (65V)



Şekil 4. 23 Yüzey sıcaklığının sabit değerde tutulması için elektrikli ısıtıcının ayarlanması (100V)

4.5 Deney Planı

Hem yivli boru için hem de düz boru için Çizelge 4.1’de verilen parametreler için deneyler yapılmıştır. Hava hızı değeri fan konvertörü yardımıyla 3 farklı değere ayarlanarak deney planı oluşturulmuştur. Aynı şekilde buharlaşmanın sağlandığı boru dış yüzey sıcaklığında 3 farklı sıcaklık değerinde sabit tutulmuştur. Besleme suyu debisi geniş bir aralıkta 30 lt/h den 220 lt/h ’e kadar değiştirilerek düşen film tipi akışın buharlaşma deneylerindeki etkisine bakılmıştır.



Şekil 4. 24 Yivli borunun alanının hesaplanması

Çizelge 4. 1 Deney planı

Boru Tipi	Hava Hızı (m/s)	Besleme Suyu Debisi (lt / h)	Besleme Suyu Sıcaklığı (°C)	Deney Kodu (Sonuçları)	Rezistans Voltajı (V)
Yivli Boru	1.5 2.2 3.0	40	30, 35, 40	Yazılım ile kayıt altına alınmaktadır.	Multimetreden okunmaktadır.
		80	30, 35, 40		
		100	30, 35, 40		
Düz Boru		120	30, 35, 40		
		140	30, 35, 40		
		160	30, 35, 40		
		200	30, 35, 40		

4.6 Yivli Borunun Alanının Hesaplanması

Isı ve Kütle transferinin eşzamanlı olarak incelendiği referans düz boru ile trapez yivli borunun ısı transfer yüzey alanı bilgisayar programı yardımıyla belirlenmiştir. Hatve, yiv derinliği ve boru boyu tanımlanarak, toplam ısı transfer yüzey alanı belirlenmiştir. Şekil 4.24'de trapez yivli borunun Solidworks programı yardımıyla yapılan alan hesabı ve Şekil 4.25'da ise bilgisayarda 3 boyutlu olarak modellenen boru görülmektedir. Çizelge 4.2'de burgulu trapez yivli borunun geometrik özellikleri verilmiştir.



Şekil 4. 25 Bilgisayarda 3 boyutlu modellenen yivli borunun görünümü

Çizelge 4. 2 Burgulu trapez yivli borunun özellikleri

Tanım	Sayısal değeri
Boru dış çapı (mm)	18
Boru iç çapı (mm)	12
Yiv adedi	114
Yiv kökleri arası genişlik (mm)	1
Yiv yan yüzeyinin uzunluğu (mm)	1.12
Yiv yüksekliği (mm)	1
Boru et kalınlığı (mm)	3
Yivin uç genişliği (mm)	1

4.7 Sayısal Görüntü İşleme

Görüntü işleme, verilerin yakalanıp ölçme ve değerlendirme işleminden sonra, başka bir aygıtta okunabilir bir biçimde dönüştürülmesi ya da bir elektronik ortamdan başka

bir elektronik ortama aktarılmasına yönelik bir çalışma olan “sinyal işlemeden” farklı bir işlemdir [75]. Görüntüler belli bir hedefe yönelmiş görüntü kaynağından alınan farklı içeriklerden oluşur. Görüntü işleme için görüntülere uygulanan ön hazırlık evresi üzerlerindeki gürültüyü (görüntü bulanıklığı, netlik, kötü görüntü) azaltmaktır. Bunun için görüntülere düşük, orta ve yüksek seviye içeren işlemler uygulanmaktadır. Düşük seviyedeki işlemler de giriş ve çıkış görüntülerin gerçekliği filtreleme ile sağlanır. Orta düzey seviyedeki işlemlerde ise görüntülerdeki nesnelerin tanınması ve sınıflandırılmasında bölme ve tanıma işlemleri gerçekleştirilir. Yüksek seviye işlemler görüntülerdeki nesneleri tanıma görüntülerin analiz edilmesini içerir. Görüntülerin bilgisayar ortamında analiz edilmesiyle de, görüntülerdeki nesnelerin görüntü içeriği detaylandırılır. Bu detaylandırma aşaması ile görüntü işleme gerçekleştirilmiş olur [76].

Düşük seviye işlemlerde görüntünün iyileştirilmesi amacıyla görüntüye filtreler uygulanır. Orta seviyedeki işlemlerde bilgisayar işlemleri için görüntülerdeki nesnelerin tanınması ve sınıflandırılmasında bölümlendirme ve tanımlama işlemleri kullanılmaktadır. Yüksek seviye işlemler, görüntülerdeki nesneleri tanıma sonrası görüntülerin analiz edilmesi ve yorumlanması işlemlerini kullanmaktadır. Yüksek seviye işlemler, görüntünün iyileştirilmesi gerektiğinde düşük ve orta seviye işlemler ile beraber uygulanabilmektedir. Görüntü yüksek çözünürlüklü ve kaliteli cihazlar ile elde edilmişse, o görüntüye sadece orta ve yüksek seviye işlemler uygulanır.

Görüntüler işlenirken kullanılan işlemler, görüntüden elde edilecek verilerin çeşitliliğine göre farklılık göstermektedir. Görüntü işleme için görüntülere uygulanan ön hazırlık evresi üzerlerindeki gürültüyü (görüntü bulanıklığı, netlik, kötü görüntü) azaltmaktır. İleriki işlemlerde; görüntü inceleme, nesne tanıma ve yorumlama gelmektedir. Bunun için görüntülere düşük, orta ve yüksek seviye içeren işlemler uygulanmaktadır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4. 3 Görüntü işleme işlem seviyeleri ve kullanım alanları [77]

Kullanım Alanları	Kullanım Amacı	İşlem Seviyesi	Görüntü Renk Biçimi
Tasarım ve İmalat Uygulamaları	Üretim süreci ürün tespiti Üç boyutlu yorumlama Nesne tanıma Ürün ayırıştırma Ürün hasar tespiti Robotik-Otomasyon	Düşük Seviye Orta Seviye Yüksek Seviye	Gri ve Siyah-Beyaz Renkli Renkli ve Siyah-Beyaz
Savunma Sanayi Güvenlik Uygulamaları	Hedef izleme Nesne tanıma Yüz tanıma Görüntü iyileştirme Parmak izi tanıma	Orta Seviye Yüksek Seviye	Renkli ve Gri Gri ve Siyah Beyaz
Tıp Alanında Görüntülerin İncelenmesi	Görüntü iyileştirme (Mikroskopik) Görüntü iyileştirme (Kardiografi) Görüntü iyileştirme (Sintigrafi) Ultrason ve röntgen görüntüleri Ortopedi	Düşük Seviye Orta Seviye Yüksek Seviye	Siyah-Beyaz Renkli ve Gri Gri ve Negatif Gri ve Siyah-Beyaz
Mimari Uygulamalar	Tarihsel kalıntılara doku giydirme Mimari yapıların yeniden modellenmesi	Düşük Seviye Orta Seviye Yüksek Seviye	Renkli
Harita ve Jeodezi Uygulamaları	Uzaktan algılama	Orta Seviye Yüksek Seviye	Renkli ve Gri
Gıda Uygulamaları	Gıda sınıflandırma Besin alan Tespiti	Orta Seviye Yüksek Seviye	Renkli ve Gri

Görüntüyü seviye olarak üçe ayırabiliriz. Sadece siyah (0 değeri) ve beyaz (1 değeri) renkleri içeren ikili görüntü, gri düzeyli görüntü ve renkli görüntü. Her üç seviyedeki görüntünün sunumu da matris formundadır. Matrisin her hangi bir değeri görüntünün o koordinatlardaki noktanın parlaklık, ısı veya buna benzer farklı niteliklerdeki değeri olabilir [78], [79].

4.7.1 Kullanılan Yöntemler

Sayısal görüntü işlemenin teknik tanımı, görüntünün sayısal ortam tarafından algılanarak tanımlanması sonucu elde edilen verinin işlem görerek ortaya çıkarılmasıdır. Görüntünün elde edilmesi, çoğaltılması, değiştirilmesi, filtreleme, renklendirme, renk ayarları ile oynama, ışıklandırma, doku atama, doku oluşturma, gölgelendirme görüntü işlemenin temel teknikleridir [80].

4.7.1.1 Eşik Belirleme

Gri ölçekli raster görüntünün işlenmesi için ikili sisteme (binary) dönüştürülürken piksellerin renk değerlerinin tek tek okunması gerekir. Gri görüntülerde her pikselin 0-255 arası renk değeri vardır. 0 siyaha, 255 ise beyaza karşılık gelir. İkili sisteme çevrilirken 0-255 arasında 128 orta değeri parlaklık değeri olarak alınır ve bu değer eşik değeri olarak atanır. Değeri 128'den küçük pikseller 0'a, değeri 128'den büyük pikseller 255'e çekilerek görüntünün siyah ve beyaz piksellerden oluşması sağlanır. Eşik belirleme tekniğinde bu eşik değeri kullanıcı tarafından belirlenir. Görüntüdeki piksellerin eşitlenmesi bu eşik değerine göre yapılır.

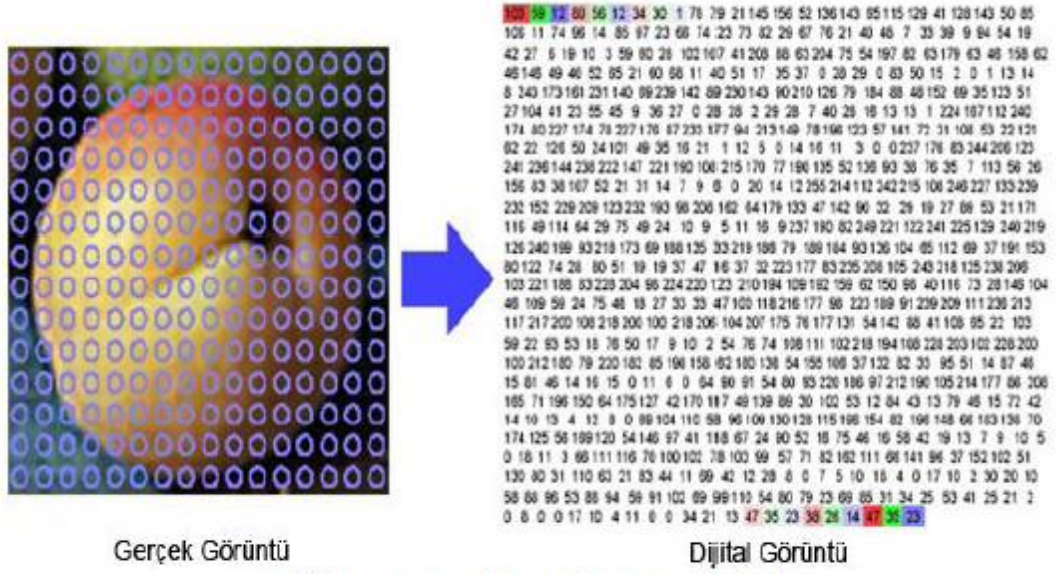
4.7.1.2 Keskinlik

Görüntüleme sonucunun bilgisayara aktarılması sonucu elde edilen görüntüde bütün detaylar görülemiyorsa veya bazı çizgiler bulanık çıktıysa yapılacak en iyi işlem keskinleştirme işlemidir.

4.7.2 Görüntü İşleme

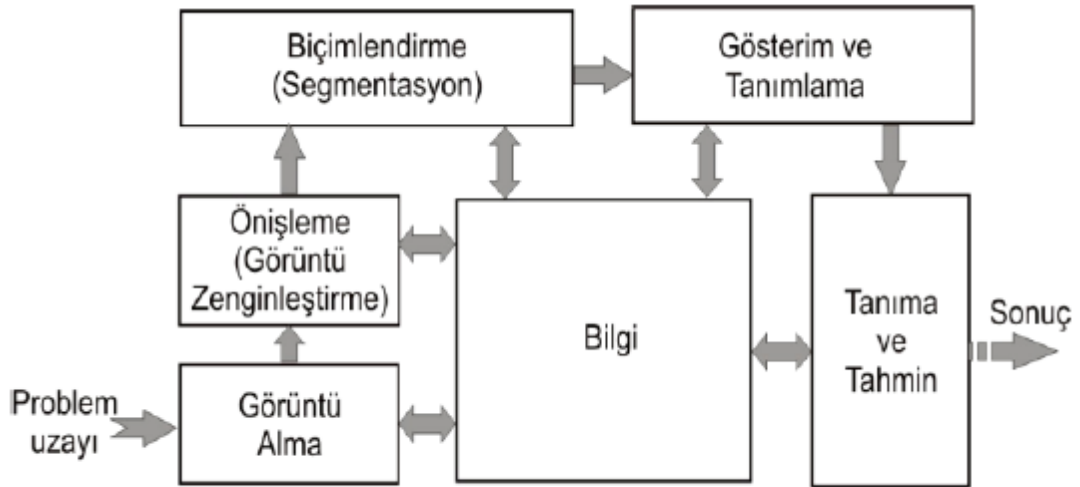
Gerçek yaşamda, bir görüntü veya resim basit 2 değişkenin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Örneğin $a(x,y)$ gibi bir fonksiyonla ifade edilen bir resimde a bir şiddet birimi (örneğin parlaklık) ve x ve y değişkenleri ise resmin gerçek koordinatlarıdır. Resim genellikle alt resimlerden oluşur ve bu alt resimlere bölge denir. Bir görüntü işleme sistemi, seçilen bölgelere uygun operasyonu yapabilmelidir. Örneğin resmin bir bölgesine bulanıklık özelliği verilirken, diğer bir bölgesine ise parlaklık özelliği verilebilir [81].

1 ve 0'lardan oluşan sayısal görüntü yapısı $a[m,n]$, 2 boyutlu dünyadan elde edilen $a(x,y)$ fonksiyonundan örnekleme tekniği kullanılarak oluşturulur (Şekil 4.26). Sayısal görüntü M ve N sayılarında satır ve sütunlardan oluşur ve satır ve sütunların kesiştiği her bölgeye piksel denir. O pikseldeki değer ise derinlik, renk ve zamanın bir fonksiyonudur [81].

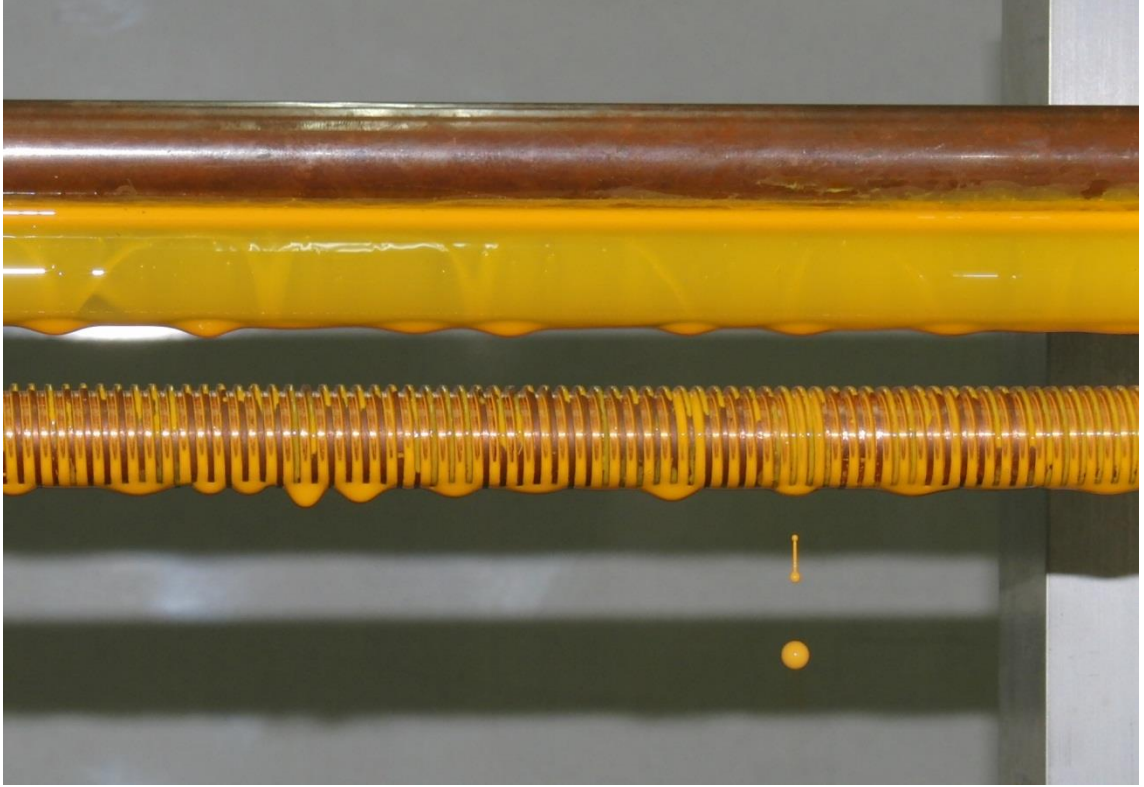


Şekil 4. 26 Sayısallaştırılmış resim [81]

Sayısal görüntü işleme çalışmalarında kullanılan birçok işlem basamakları vardır. En genel haliyle Şekil 4.27’de grafiksel olarak verilmiştir [78].



Şekil 4. 27 Görüntü işleme genel akım şeması [78]



Şekil 4. 28 Düşen film akışının görüntülenmesi

4.7.3 Sistem Tasarımı

40 cm genişliğindeki besleyici görevi yapmakta olan düz yivsiz bir borunun gövdesinde borunun en alt noktasında 1.5 mm aralıklarla delikler açılmıştır. Aynı genişlikte saf bakır başka bir tüp, dengeleme maksadıyla hemen altına yerleştirilmiştir. Sırasıyla sisteme besleyici borusu, dengeleme tüpü ve test borusu şeklinde belirtilen aralıklarla yerleştirilmiştir.

Görüntü işleme yapılacağından çeşitli ışıklar altında farklı renkli solüsyonlarla görüntüleme yapılmıştır. Kırmızı, siyah, mavi, yeşil ve sarı renkli solüsyonlar deney düzeneğinde denenmiştir. Sarı renkli su bazlı boya ile suyun karışımının görüntüleme için en uygun sonuçları verdiği kanaatine varılmıştır (Şekil 4.28).

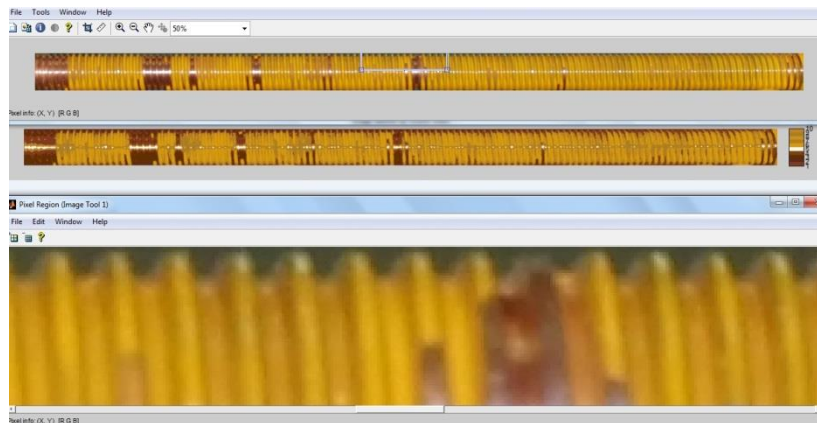
Görüntü işleme için kullanılan sıvı filmi (sarı renkli su bazlı boyalı su) öncelikle besleyici borunun deliklerinden 1.4 mm uzaklıktaki dengeleme tüpüne ve sonrasında da test borusunun üzerine akmaktadır. Test edilen borulardan bir grubuna ekstenel olarak bir grubuna da burgulu olarak farklı geometrilere sahip yivler açılmıştır. Toplam 8 adet

farklı geometrilere sahip yivli boru görüntülerinin sayısal olarak işlenmesi ve analizi yapılarak ıslak yüzey alanlarının tespiti gerçekleştirilmiştir.

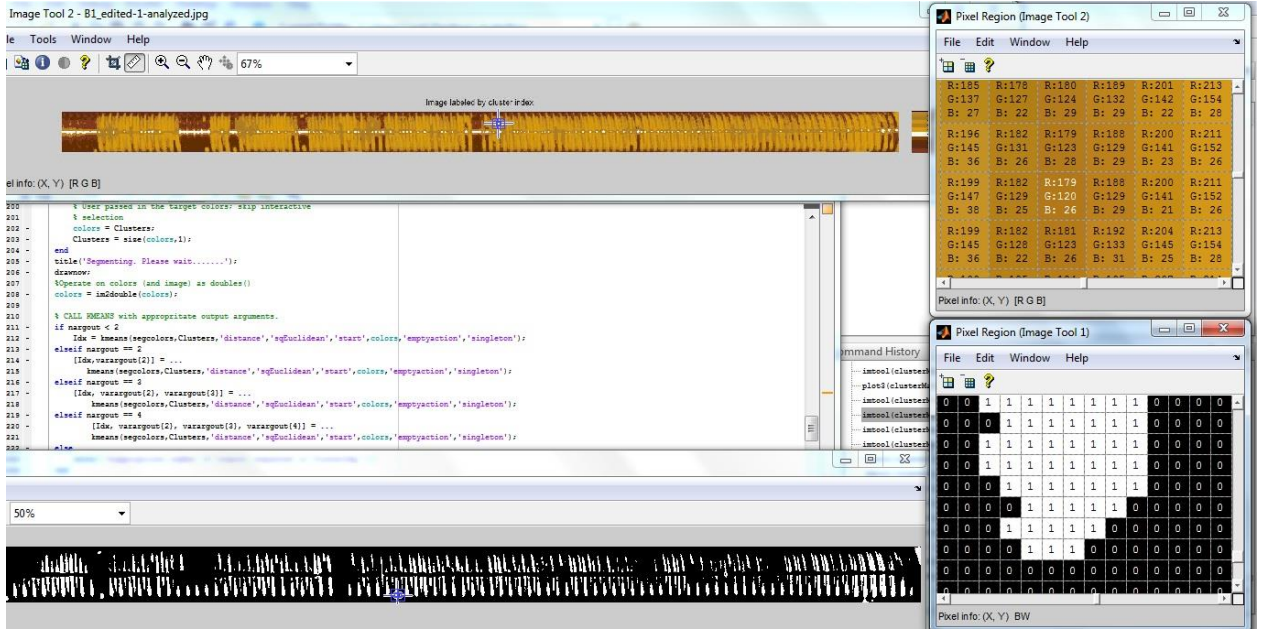
4.7.4 Fotoğrafların Matlab Programında Analizi ve Ön Hazırlık Evresi

Fotoğrafların çekilmesi sırasında pozlama telafisi “0 EV” olacak şekilde ayarlanmıştır. Diyafram açıklığı, enstantane hızına bağlı olarak ayarlanarak resimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Hızlı çekim yapan kamera ile elde edilen görüntüler, öncelikle analize hazır hale getirilmiştir. Bunun için Matlab görüntü işleme araç kutusunda bulunan “Görüntü aracı (Im Tool)” özelliği kullanılmıştır (Şekil 4.29). Matlab programının çalışma ekranında büyüteç özelliği aracılığıyla piksel kontrolü yapılırken, resim üzerinde kırpma işlemi uygulandıktan sonra, kontrast ayarı yapılmıştır ve buna bağlı olarak renk histogramları elde edilmiştir. Resimlerde kumlanmanın önlenmesi içinde, bir grafik programı yardımıyla öncelikle resim “kumlanma kontrolü”ne ve sonrasında “keskinleştirme işlemi”ne tabii tutulmuştur.

Şekil 4.30’da görülebileceği üzere Matlab programında görüntü işleme araçlarının kullanımı ile boru yüzeyindeki ıslaklık yüzey alanı ve boru yüzeyinin ayırt edilebilmesi için piksel piksel resim sayısal olarak ayrıştırılmıştır. Resim içerisindeki boru yüzeyi (kahverengi) 5 farklı katmana, su bazlı boyalı akışkan (sarı renk) ise 5 farklı katmana ayrıştırılmıştır. Bu renk tonları belirlenirken kırmızı, mavi, kırmızı ana renklerinin piksel piksel ayrıştırılmış sayısal değerleri kullanılmıştır. Matlab programı kullanılarak on farklı katmanın dökümü çıkartılmıştır ve bu katman kodlarının değerlendirilmesi sonucunda sıvı filminin, bakır boru yüzeyine oranı belirlenmiştir.



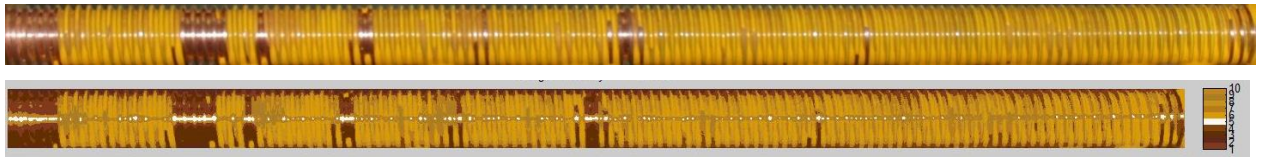
Şekil 4. 29 Matlab “Görüntü aracı (Im Tool)” çalışma ekranı



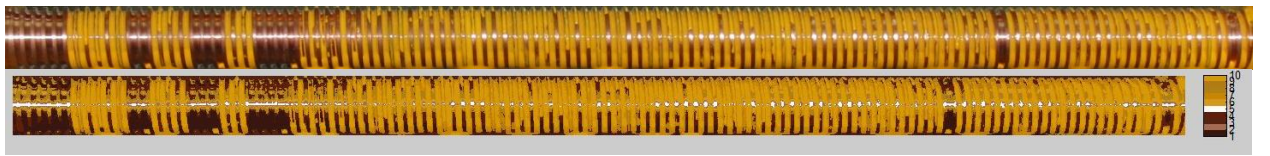
Şekil 4. 30 Matlab programında görüntü işleme araçlarının kullanımı

4.7.4.1 Görüntü İşleme Sonuçları

Matlab programı yardımıyla ıslaklık yüzey alanının belirlenmesi için yapılan görüntü işleme sonuçları burgulu yivli borular için Şekil 4.31'den Şekil 4.34'e kadar olan görüntülerle belirtilmiştir. Şekillerde öncelikle görüntüleme analizine tabii tutulan borunun fotoğrafı, sonrasında görüntüleme sonucunda elde edilen katmanlarına ayrıştırılmış resim yer almaktadır. Aynı şekilde Şekil 4.35'den Şekil 4.38'e kadar olan görüntülemelerde aksel yivli borular için görüntüleme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4. 31 Burgulu trapez yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



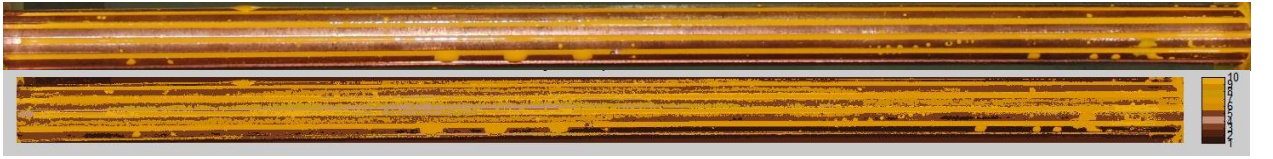
Şekil 4. 32 Burgulu yuvarlak yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



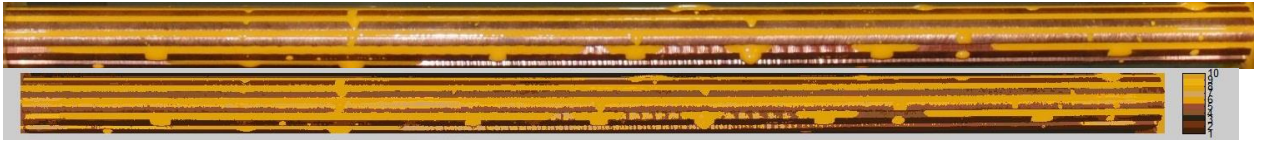
Şekil 4. 33 Burgulu üçgen yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



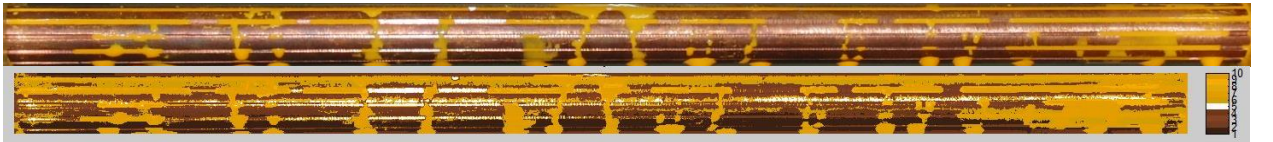
Şekil 4. 34 Burgulu kare yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



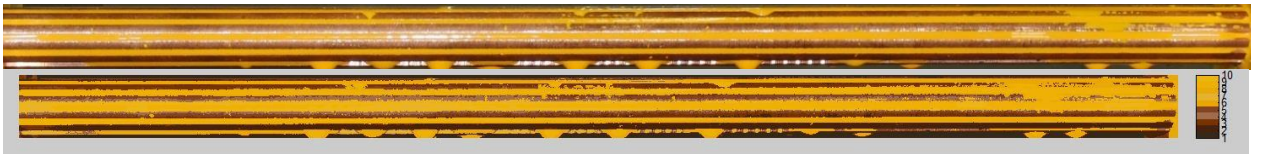
Şekil 4. 35 Eksenel kare yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



Şekil 4. 36 Eksenel trapez yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



Şekil 4. 37 Eksenel yuvarlak yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi



Şekil 4. 38 Eksenel üçgen yivli borunun ıslaklık yüzey alanı ve görüntü işleme sonrası resmi

Her bir boru kod içerisinde ifade edilirken öncelikle yivin tipine bağlı olarak ilk harfini, sonrasında ise yivin geometrisine bağlı olarak ikinci harfini almaktadır. Burgulu yivli borular için “B” harfi kullanılmıştır ve yivin geometrik şekline bağlı olarak, üçgen için

“Ü”, yuvarlak için “Y”, trapez için “T”, kare içinde “K” harfi kullanılarak borular kodlanmıştır.

Çizelge 4. 4 Burgulu yivli boruların katmanlarına göre alan oranı

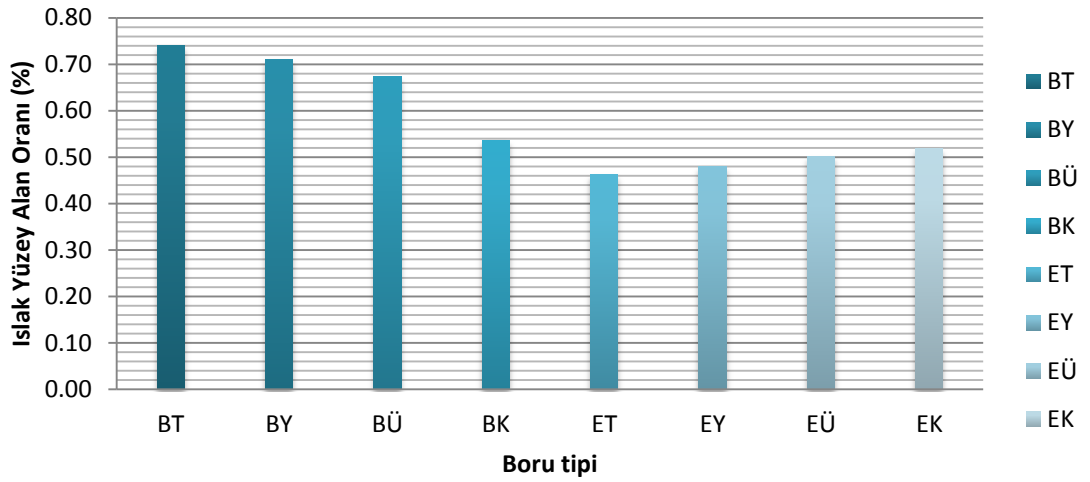
Yiv tipine göre alan oranı (%) Katman sayısı	BT	BY	BÜ	BK
1. Katman	7.33	7.50	5.77	7.46
2. Katman	4.49	2.91	7.31	5.27
3. Katman	5.32	5.66	7.45	8.39
4. Katman	7.57	11.13	10.55	12.76
5. Katman	1.33	1.80	1.61	12.52
6. Katman	17.47	7.17	22.47	2.07
7. Katman	20.99	17.83	4.11	13.94
8. Katman	24.46	8.21	17.26	17.96
9. Katman	7.86	10.87	17.55	7.61
10. Katman	3.17	26.90	5.92	12.02

Çizelge 4. 5 Eksenel yivli boruların katmanlarına göre alan oranı

Yiv tipine göre alan oranı (%) Katman sayısı	EK	ET	EY	EÜ
1. Katman	9.48	11.24	13.41	9.1
2. Katman	10.06	13.69	13.31	11.14
3. Katman	9.71	7.44	10.16	12.43
4. Katman	2.78	14.34	11.39	7.67
5. Katman	16.23	7.06	3.77	9.5
6. Katman	5.94	7.15	14.24	10.26
7. Katman	20.44	3.51	14.86	3.44
8. Katman	6.52	21.54	6.86	8.19
9. Katman	12.35	6.75	3.56	20.44
10. Katman	6.5	7.28	8.45	7.83

Aynı şekilde eksenel yivli borular içinde “E” harfi kullanılarak kodlama yapılmıştır. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de her bir katmanın sahip olduğu alan yüzdesi farklı yivli borular için verilmiştir. Islak yüzey alan katmanlarının, toplam yüzey alanına oranlanması sonucunda ıslak yüzey alan yüzdesi belirlenmiştir.

Eksenel ve burgulu yivli borular ıslaklık yüzey alan oranı açısından karşılaştırıldığında eksenel yivli geometrili boruların daha düşük ıslaklık yüzey alan oranlarına sahip olduğu Şekil 4.39’da görülmektedir. Islak yüzey alanının en yüksek olduğu yiv, burgulu ve trapez geometrili yiv olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 39 Dört farklı geometrili burgulu ve eksenel yivli olmak üzere toplam 8 adet borunun ıslak yüzey alanı sonuçları

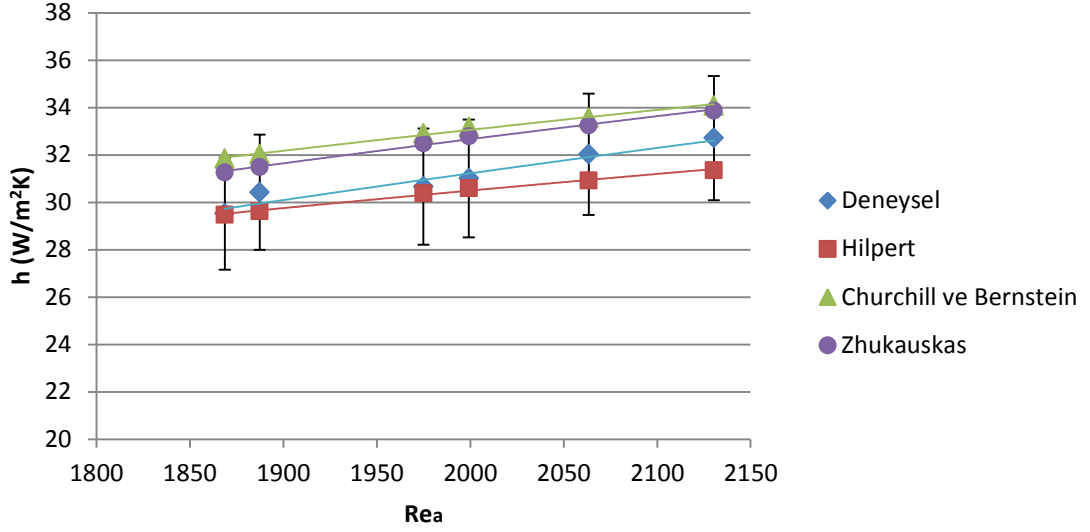
BÖLÜM 5

BULGULAR

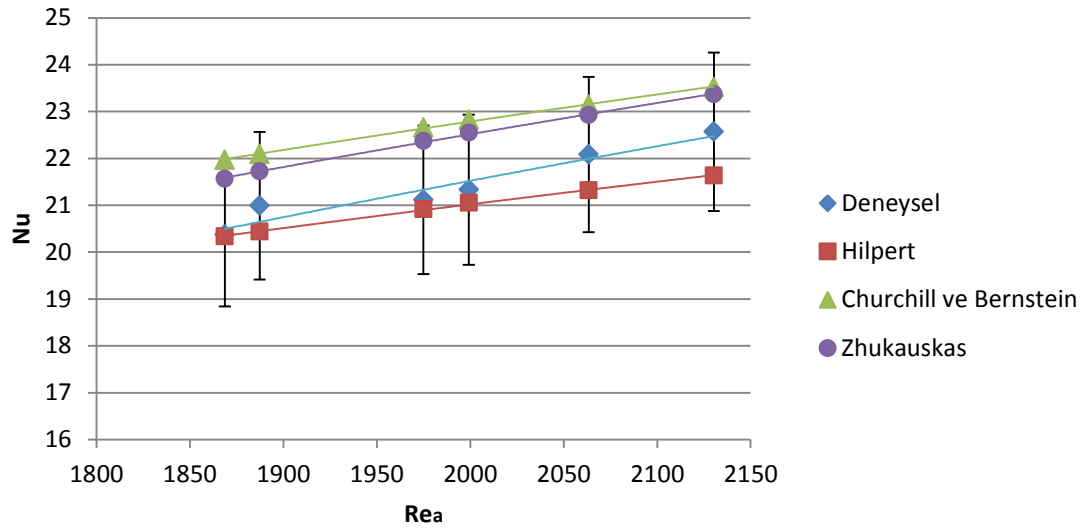
Bulgular, 5 farklı ana başlıkta incelenmiştir. Öncelikle yivli boru ve referans düz boruda zorlanmış taşınım koşullarında düşen film tipi akışı oluşturulmadan alınan ölçümler ile literatürdeki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın devamında, zorlanmış taşınım koşullarında düşen film tipi akış oluşturularak, yivli boru ve referans düz boru için farklı besleme suyu sıcaklıkları, su debileri, hava hızlarında deneyler yapılmıştır. Referans düz boru ile yivli borunun deneylerinden elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Bölüm 3’de belirtilen Colburn eşitliği kullanılarak hesaplanan değerler ile deney sonucunda elde edilen bulguların karşılaştırılmasına ve bunların akış tipi grafiğine de yer verilmiştir. Deneysel bulgular kullanılarak elde edilen korelasyon denklemleri, karşılaştırma grafikleri son ana başlıkta ifade edilmiştir.

5.1 Yivli Boru ve Referans Düz Boru için Düşen Film Tipi Akışı Olmadan Zorlanmış Taşınım Koşullarında Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

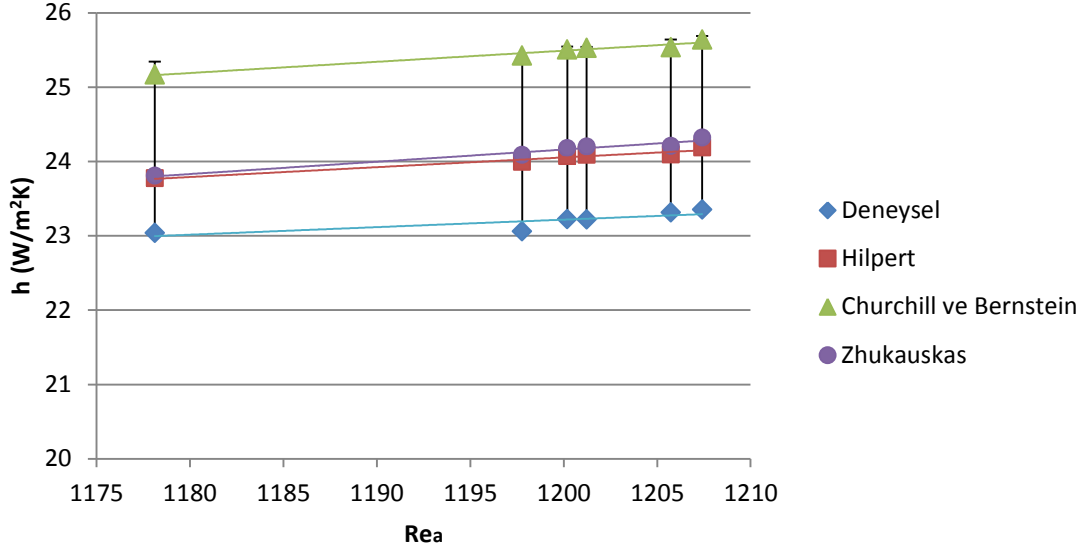
Hilpert [69], Zhukauskas [70], Churchill ve Bernstein [71]’in bağıntıları kullanılarak, deney koşullarındaki Nu ve h değerleri hesaplanmıştır. Yivli boru için deneysel veriler yardımıyla belirlenen h_{deneysel} ve Nu_{deneysel} değerleri sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de karşılaştırılmıştır. Yüzde hata çubukları ile şekillerde de ifade edildiği üzere h ve Nu değeri ± 7.5 hata oranı ile literatürdeki Hilpert [69], Zhukauskas [70], Churchill ve Bernstein [71]’in korelasyon sonuçlarını kapsamaktadır.



Şekil 5. 1 Yivli boruda zorlanmış taşınım koşullarında h değerlerinin karşılaştırılması ($T_f=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

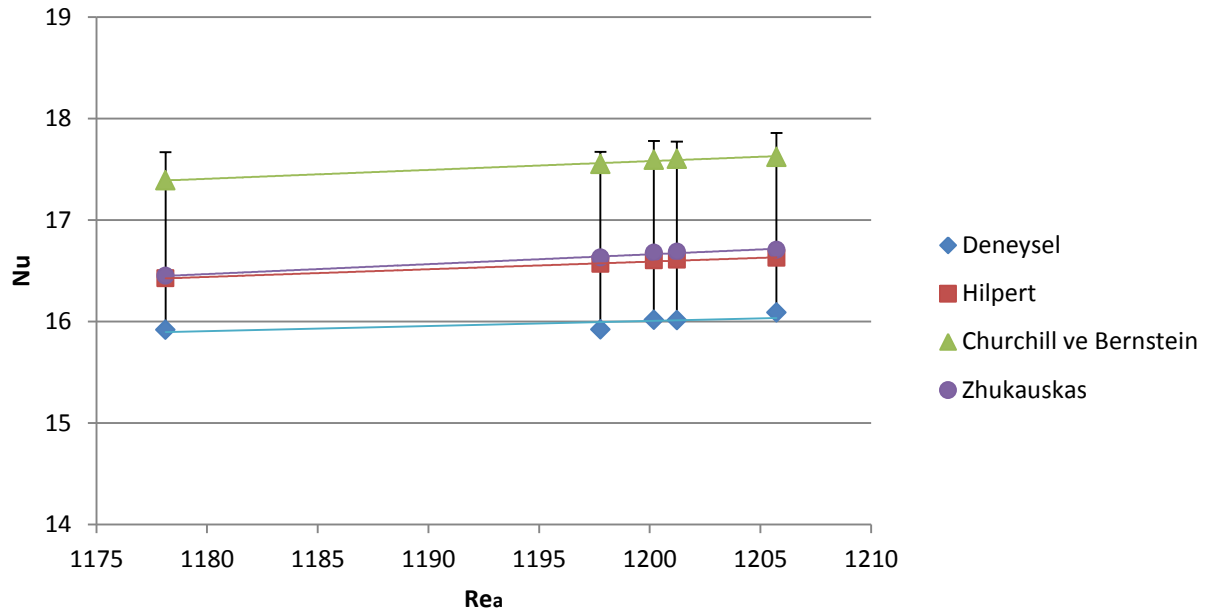


Şekil 5. 2 Yivli boruda zorlanmış taşınım koşullarında Nu değerlerinin karşılaştırılması ($T_f=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Şekil 5. 3 Referans düz boruda zorlanmış taşınım koşullarında h değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

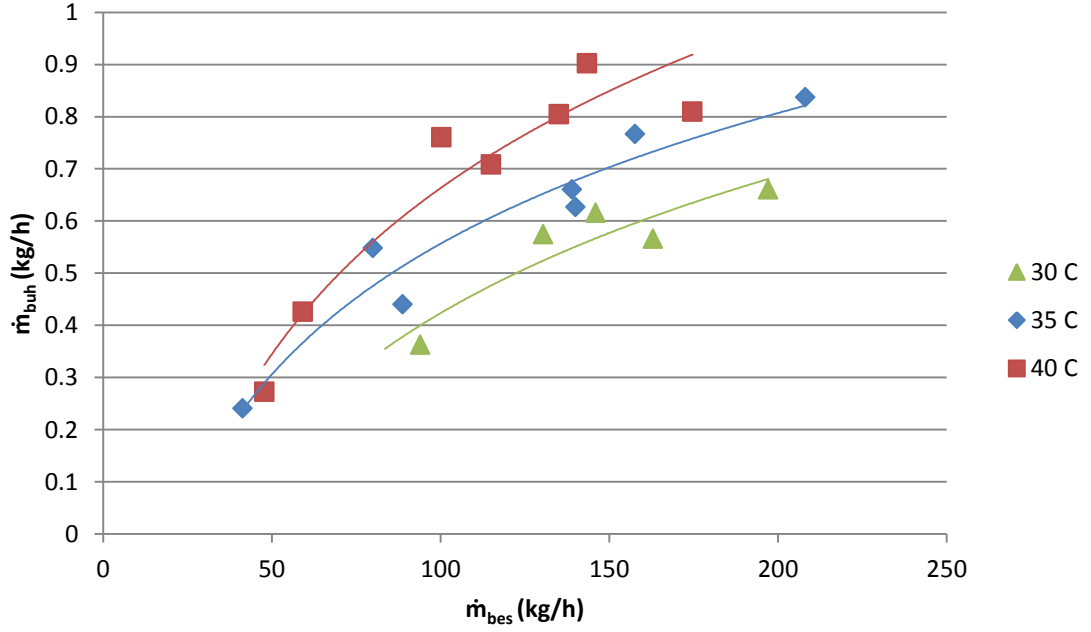
Referans düz boru içinde deney koşullarındaki h_{deneysel} ve Nu_{deneysel} değerleri hesaplanmıştır ve sırasıyla literatürdeki değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 'de verilmiştir. h değeri $\pm 12\%$ ve Nu değeri $\pm 11\%$ hata oranı ile literatürdeki Hilpert [69], Zhukauskas [70], Churchill ve Bernstein [71]'in korelasyon sonuçlarını kapsamaktadır.



Şekil 5. 4 Referans düz boruda zorlanmış taşınım koşullarında Nu değerlerinin karşılaştırılması ($T_y=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

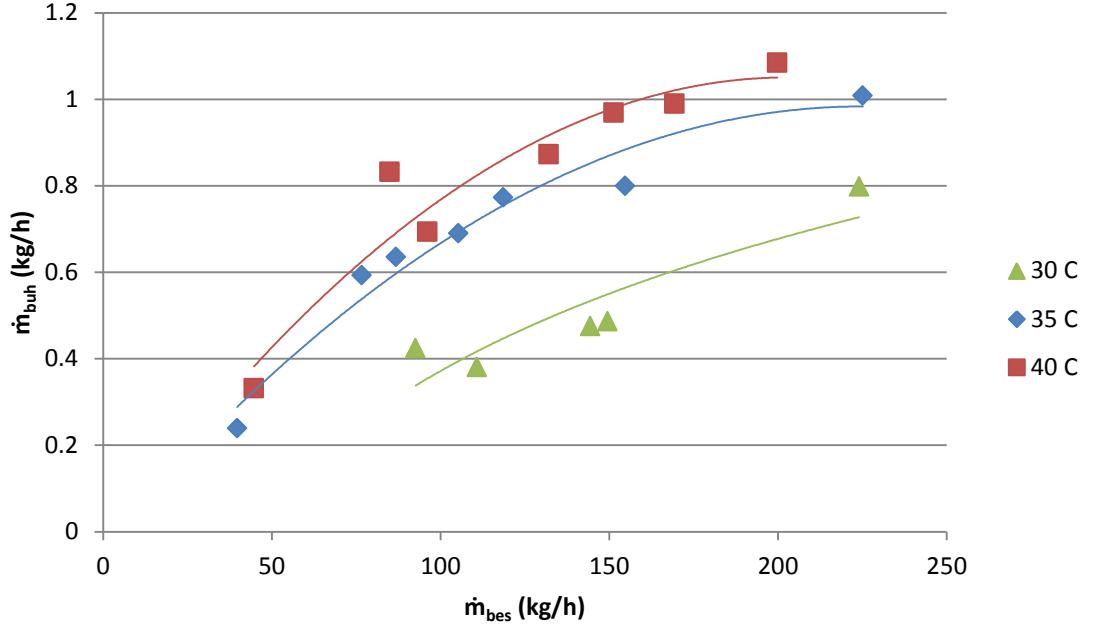
5.2 Yivli Boru ve Referans Düz Boru için Düşen Film Tipi Akışı Olması Halinde Zorlanmış Taşınım Koşullarında Yapılan Deneylerin Sonuçları

Deney düzeneğinde besleme suyu debisi, tüm deneylerde 30-220 lt/h aralığında iğne vana yardımıyla ayarlanarak değiştirilmiş ve elektromanyetik debimetre ile ölçülmüştür. Böylece düşen su filminin Reynolds sayısı hesaplanarak, 50 ile 500 aralığında olduğu görülmüştür.

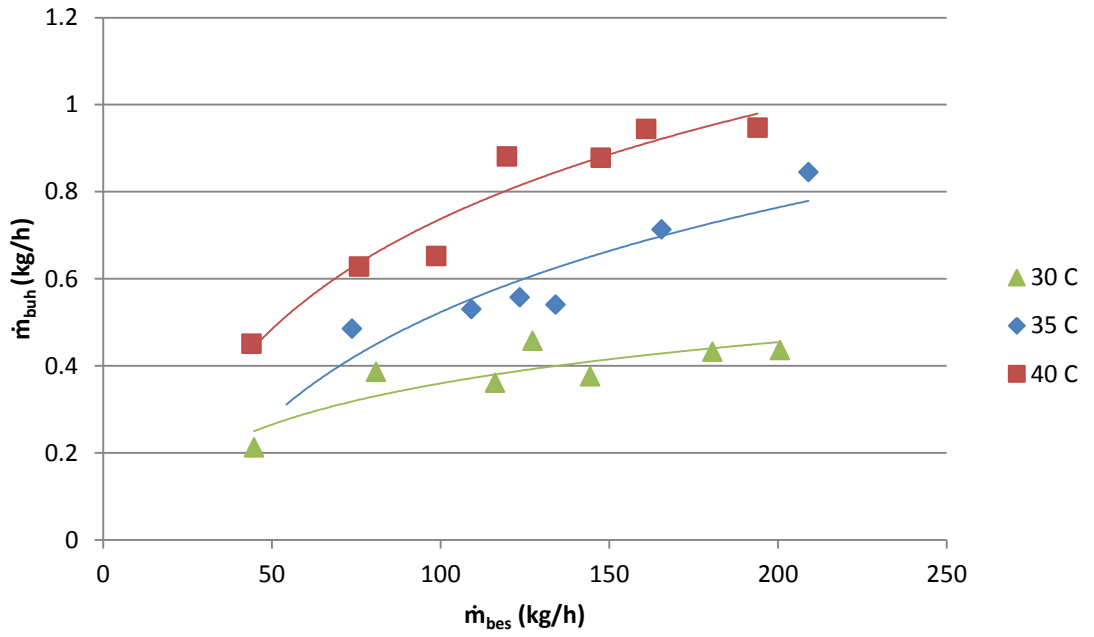


Şekil 5. 5 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşan su miktarı

Tüm deneylerde, eşzamanlı ısı ve kütle transferi gerçekleştiğinden, sabit yüzey ve besleme suyu sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde ilk olarak yivli boru yüzeyinden akan su filminden havaya olan buharlaşma miktarı incelenmiştir. Buharlaşan suyun kütledebisinin, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7’de, besleme suyu debisine bağlı olarak değişimi farklı zorlanmış taşınım koşulları için verilmiştir. Besleme suyu debisindeki artış ile buharlaşan su miktarı da artmaktadır.

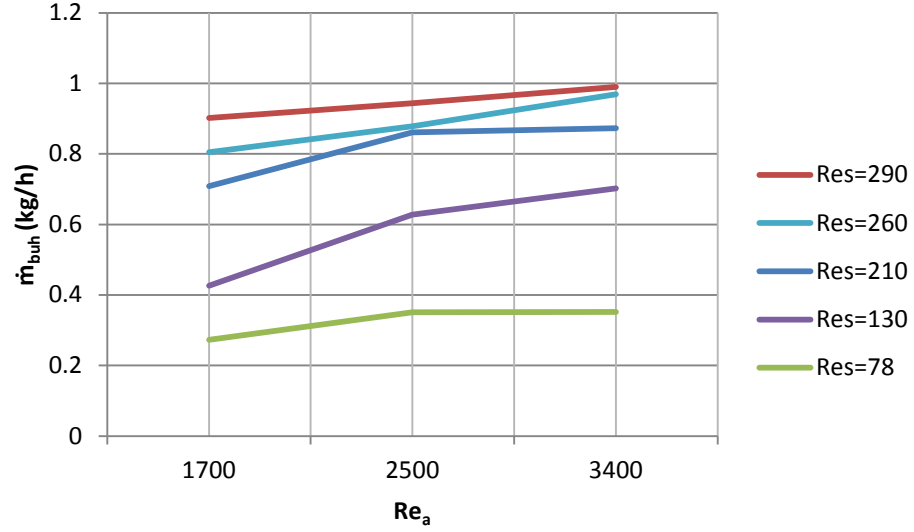


Şekil 5. 6 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3.0 m/s hızda buharlaşan su miktarı



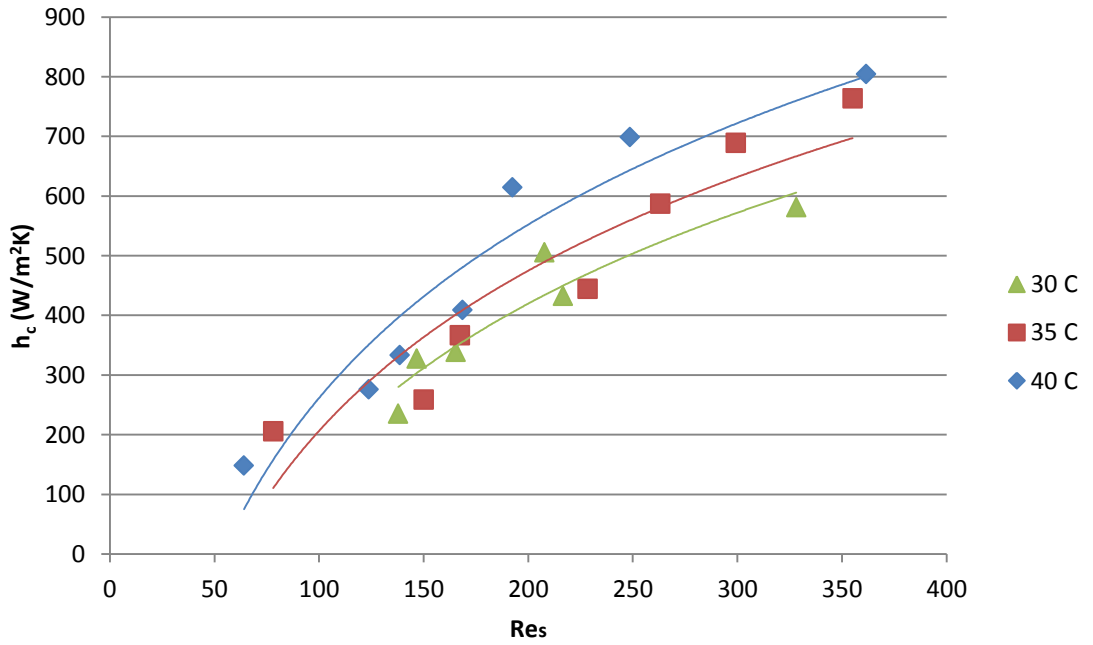
Şekil 5. 7 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 2.2 m/s hızda buharlaşan su miktarı

Düşen su filminin Reynolds sayısına ve havanın Reynolds sayısına bağlı olarak buharlaşan su debisi Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

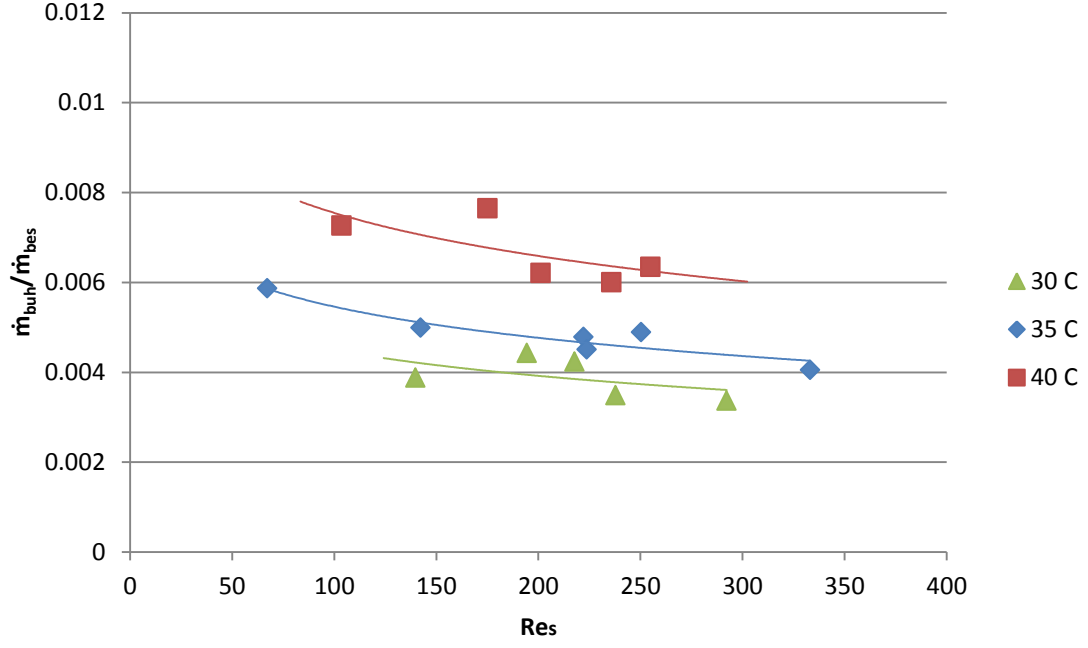


Şekil 5. 8 Yivli boruda $T_{bes}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması durumunda farklı zorlanmış taşınım koşullarında buharlaşan su miktarı

Tüm besleme suyu sıcaklıklarında yapılan deneylerde, besleme suyu debisinin artışı ile Bölüm 3’de belirtildiği şekilde hesaplanan su-hava arayüzeyi ısı taşınım katsayıları artmaktadır. h_c değerinin, 150 ile $800\text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değiştiği Şekil 5.9’da görülmektedir.

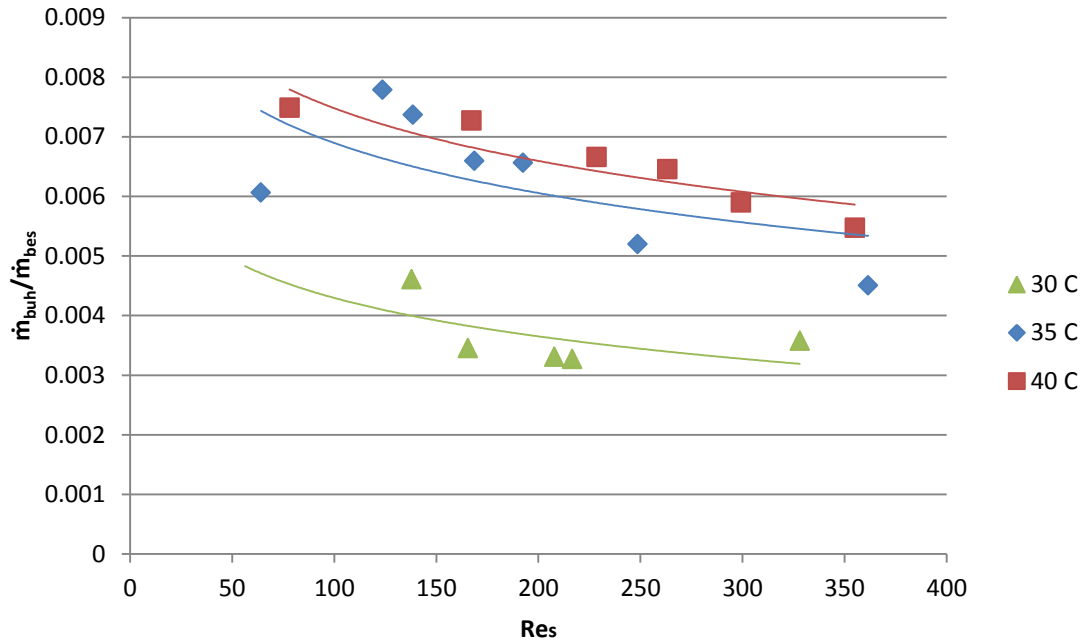


Şekil 5. 9 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3.0 m/s hızda h_c ($\text{W/m}^2\text{K}$) değerleri



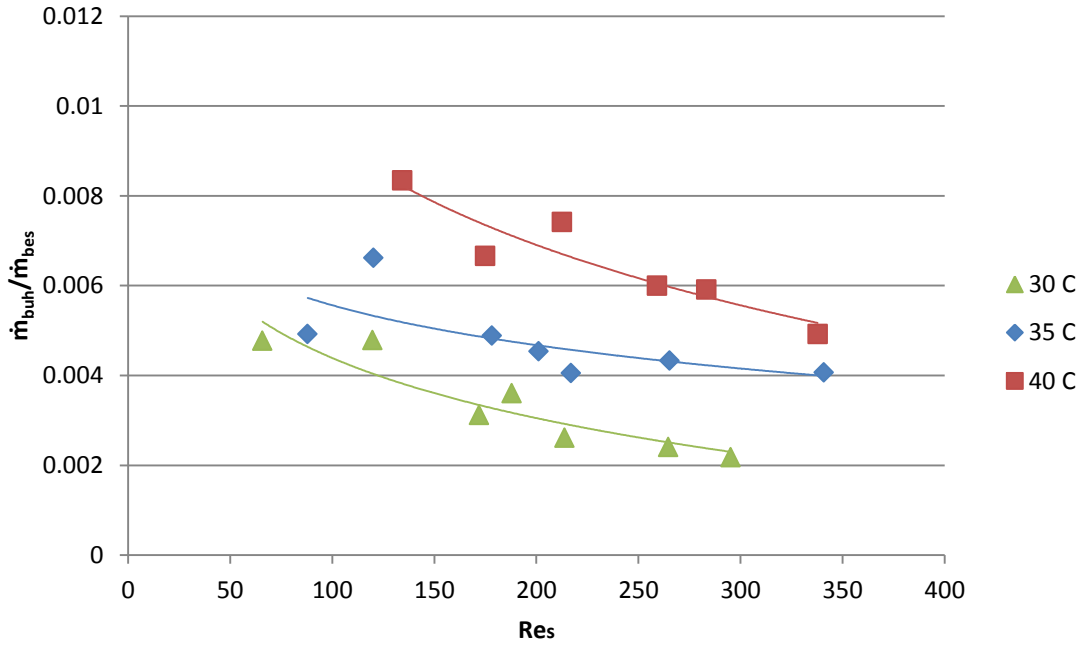
Şekil 5. 10 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşma oranı

Buharlaşma oranı değerinin yivli boruda 1.5 m/s hava hızındaki zorlanmış taşınım koşullarında değişimi Şekil 5.10'da verilmiştir. Buharlaşma oranının besleme suyunun sıcaklık değeri arttıkça, arttığı ancak besleme suyu debisi arttıkça azaldığı saptanmıştır.



Şekil 5. 11 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 3 m/s hızda buharlaşma oranı

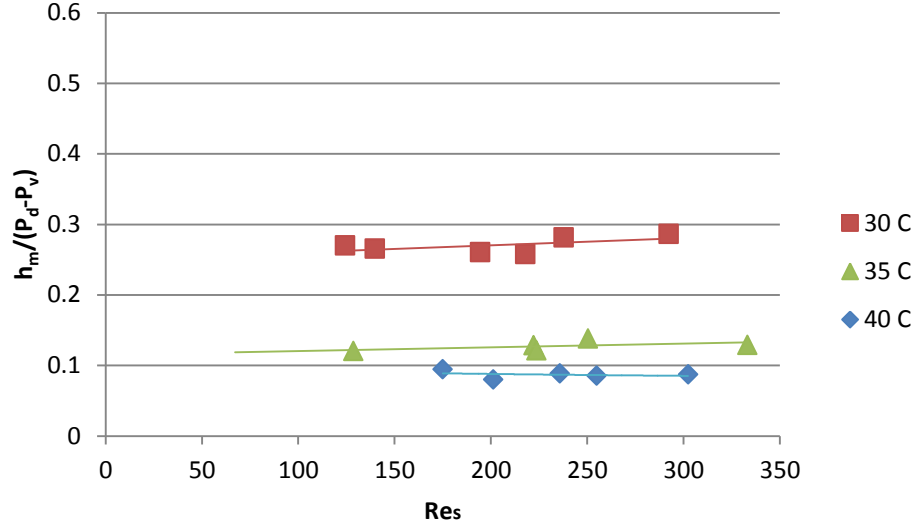
Hava hızına bağlı olarak buharlaşma oranının arttığı, 30 °C olması durumunda yaklaşık 0.003 ile 0.004 arasında, 35 °C olması durumunda yaklaşık 0.004 ile 0.006 arasında, 40 °C olması durumunda yaklaşık 0.006 ile 0.008 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).



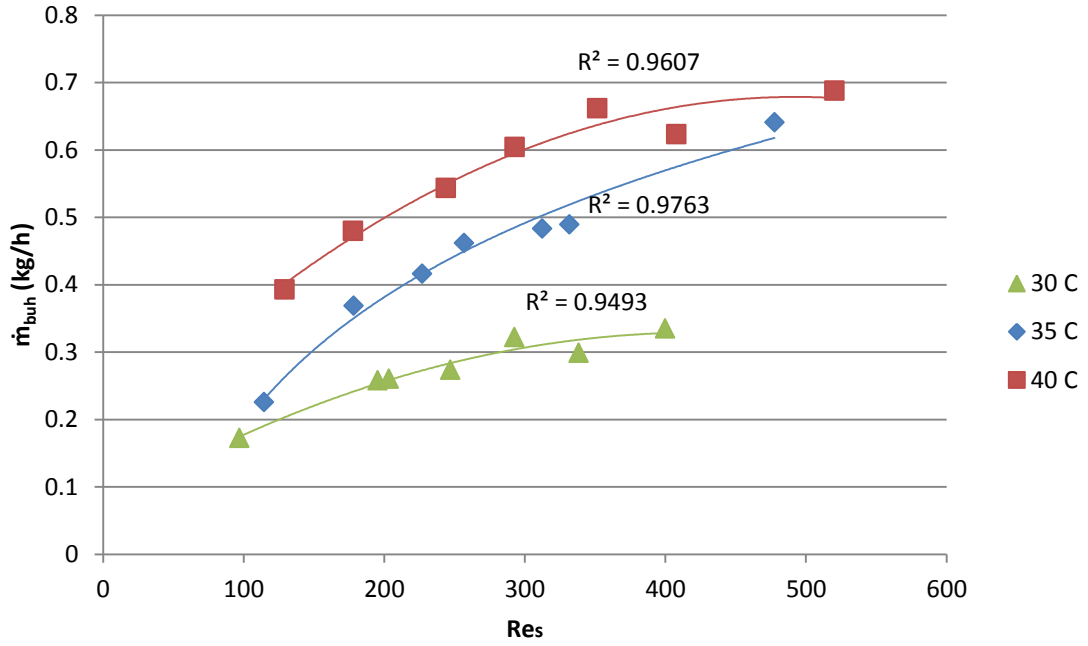
Şekil 5. 12 Yivli boruda farklı sıcaklıklarda 2.2 m/s hızda buharlaşma oranı

Ayrıca doyma basıncı ile su buharı kısmi basıncının değişiminin, taşınım ile kütle geçiş katsayısına (m/s) etkisi irdelenmiştir. Yivli boruda $h_m/(P_s - P_v)$ değerinin 1.5 m/s hava hızında farklı besleme suyu sıcaklıklarındaki değişimi Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Besleme suyu debisinin artışı ile bu oranın değişmediği, sıcaklık artışı ile arttığı gözlemlenmiştir.

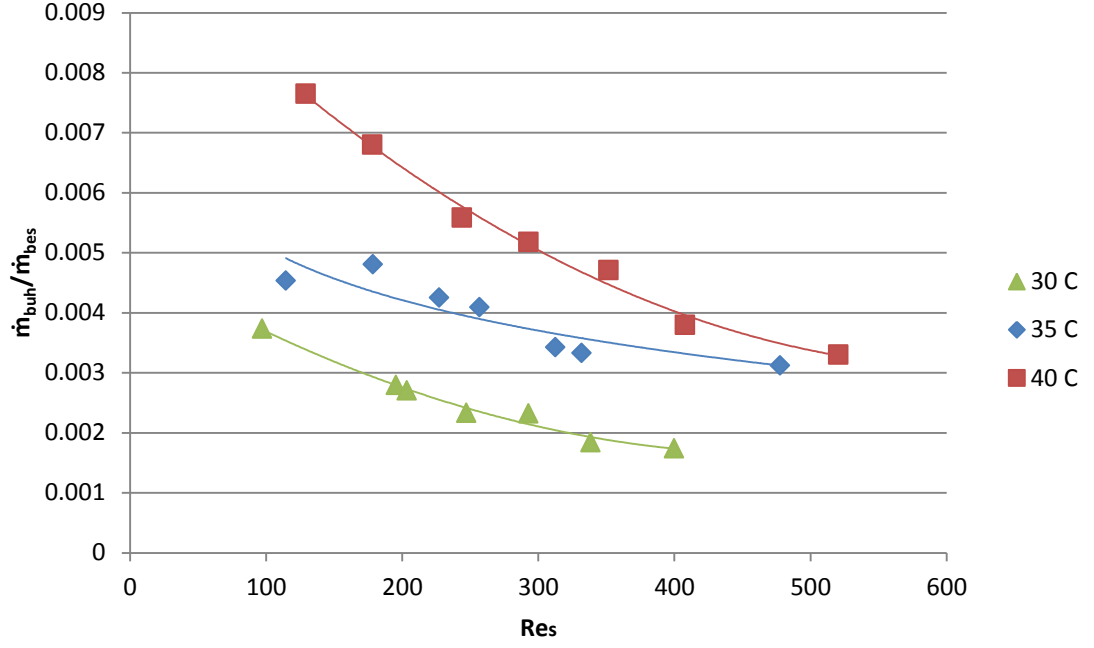
Yivli boru deneylerinden elde edilen bulgular ile karşılaştırma yapmak için aynı zorlanmış taşınım koşullarında deneyler referans düz boru ile tekrarlanmıştır. Yüzeyi düz olan referans boru ile yapılan deneylerde öncelikle buharlaşan su miktarı farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda belirlenmiştir. Besleme suyu debisine bağlı olarak buharlaşan suyun kütledebisi değerleri Şekil 5.14'de verilmiştir. Aynı şartlar altında buharlaşma oranı ise binde 7 ile binde 2 arasında değişmektedir ve Şekil 5.15'de değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5. 13 Yivli boruda farklı besleme suyu sıcaklıklarında 1.5 m/s hava hızında $h_m/(P_d-P_v)$ (m/kPa.s) değerleri

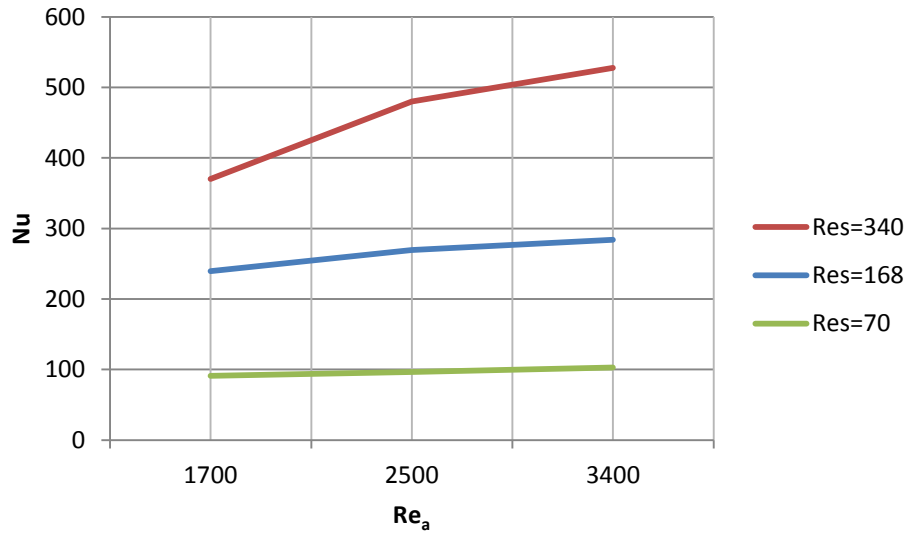


Şekil 5. 14 Referans düz boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşan su miktarı



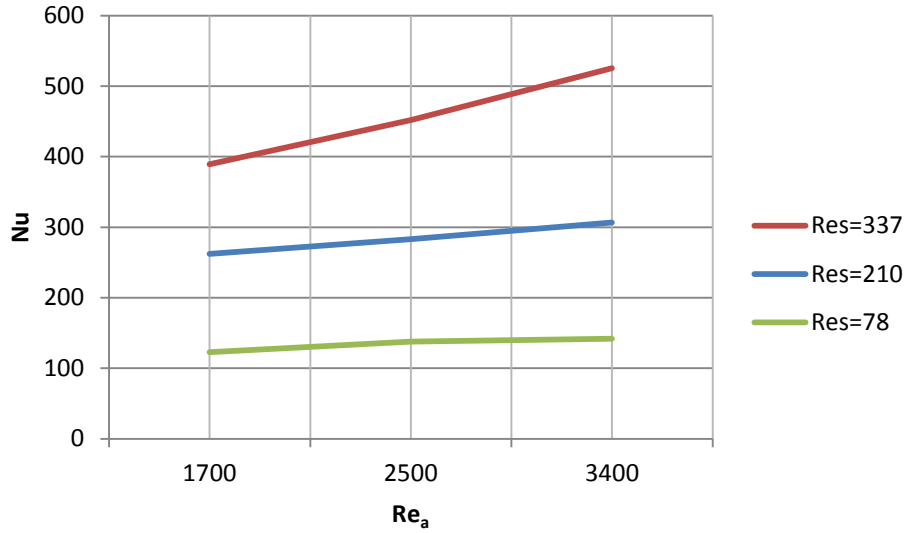
Şekil 5. 15 Referans düz boruda farklı sıcaklıklarda 1.5 m/s hızda buharlaşma oranı

Yivli boruda ısı taşınım katsayısı belirlendikten sonra, boyutsuz parametreler belirlenerek, deneysel bulgular Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de verilmiştir. Eş zamanlı ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği durumda, besleme suyu sıcaklığı 35 °C ve 40 °C iken Re_s, Re_a bağlı olarak Nu değerlerinin değişimi incelenmiştir.



Şekil 5. 16 Farklı besleme suyu debilerinde (T_{bes}=35 °C) yivli boruda Nu değerlerinin Re_a ile değişimi

Nu değerlerinin havanın Reynolds sayısının artması ile arttığı gözlemlenmektedir. Besleme suyu debisinin artması ile Nu değerlerindeki artışın daha fazla olduğu belirlenmiştir.

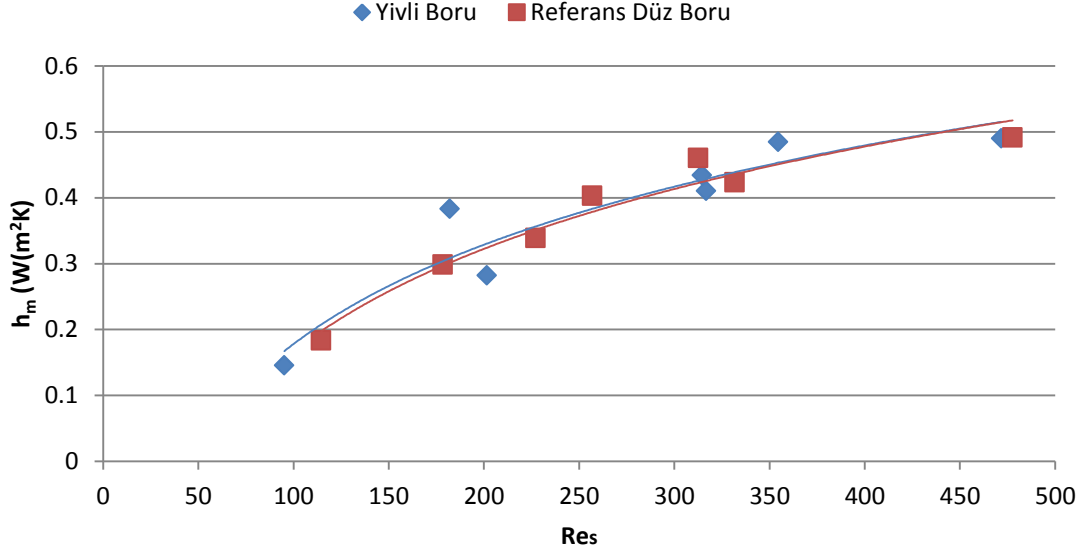


Şekil 5. 17 Farklı besleme suyu debilerinde ($T_{bes}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$) yivli boruda Nu değerlerinin Re_a ile değişimi

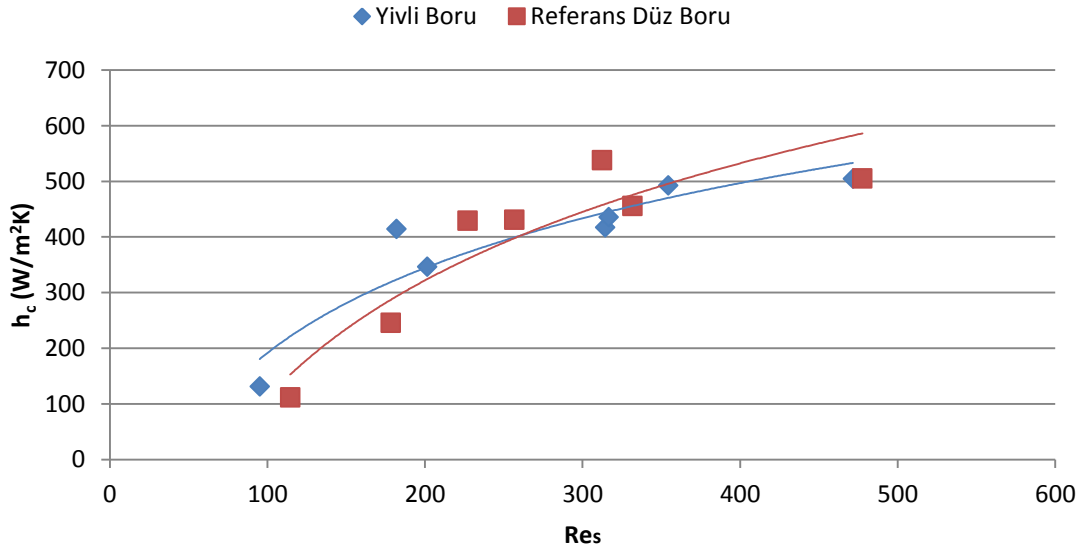
5.3 Referans Düz Boru ile Yivli Boruda Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması

Referans düz boru ile yapılan deneylerin sonucunda elde edilen bulgular ile yivli boru ile yapılan deneylerin sonucunda elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Bölüm 3’de belirtilen taşınım ile kütle geçiş katsayısı (h_m) değerinin yivli boru için elde edilen değerleri ile referans düz boru değerleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Besleme suyu debisine bağlı olarak h_m değerinin referans düz boru ve yivli boru için 0.2 ile 0.5 m/s değerleri arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Taşınım ile kütle geçiş katsayısının, tüm besleme suyu debilerinde referans düz boru ile yivli boruda çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Isı taşınım katsayısı referans düz boru ile karşılaştırıldığında, yüksek besleme suyu debilerinde referans düz boruda çok az bir artış sağlandığı belirlenmiştir. Düşük besleme suyu debilerinde ise ısı taşınım katsayısı değerlerinin genelde aynı kaldığı gözlemlenmektedir (Şekil 5.19).

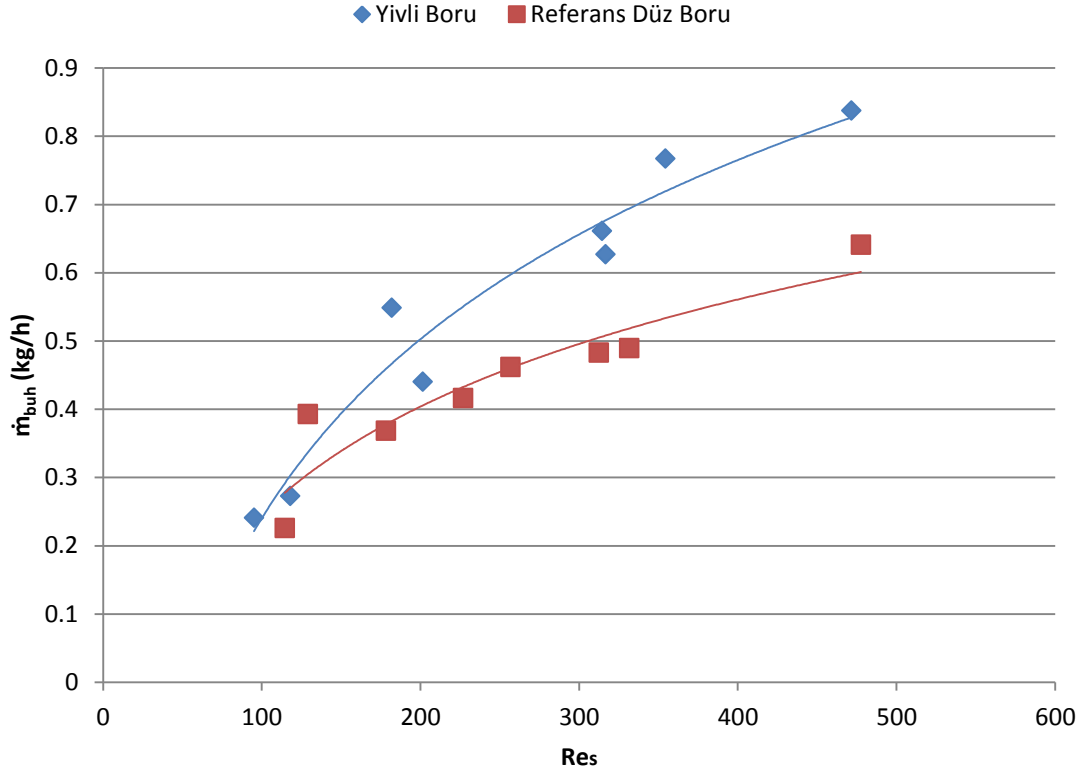


Şekil 5. 18 Referans düz boru ile yivli boruda taşınım kütlesi geçiş katsayısı (h_m) (m/s)

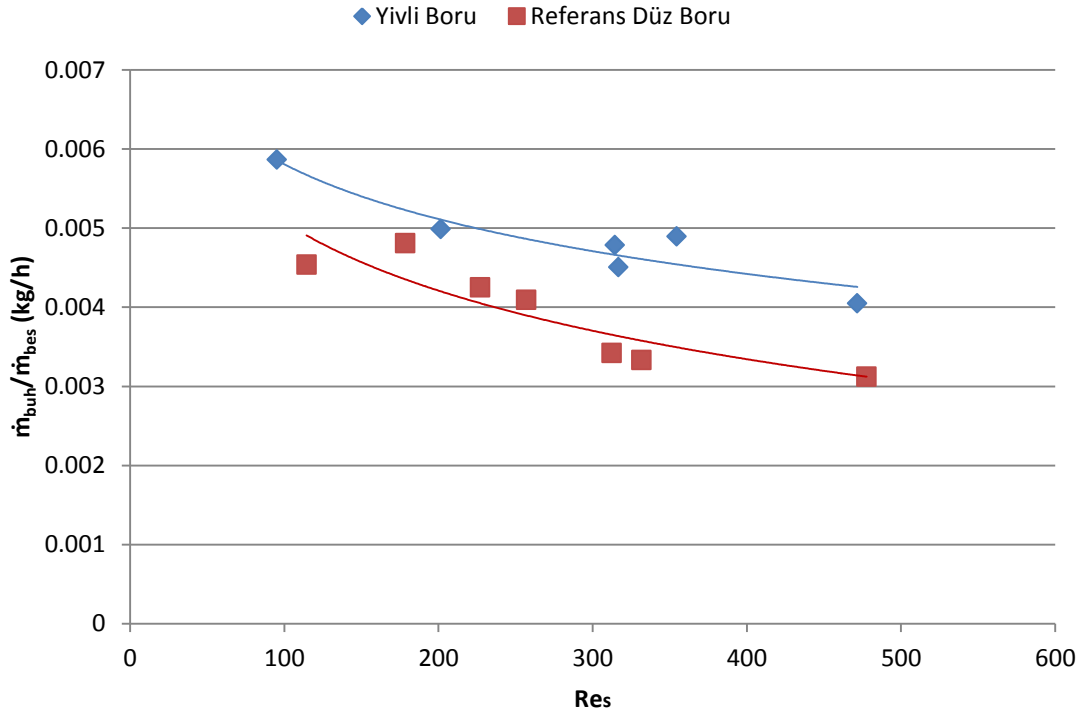


Şekil 5. 19 Referans düz boru ile yivli boruda ısı taşınım katsayısı (h_c) (W/m²K)

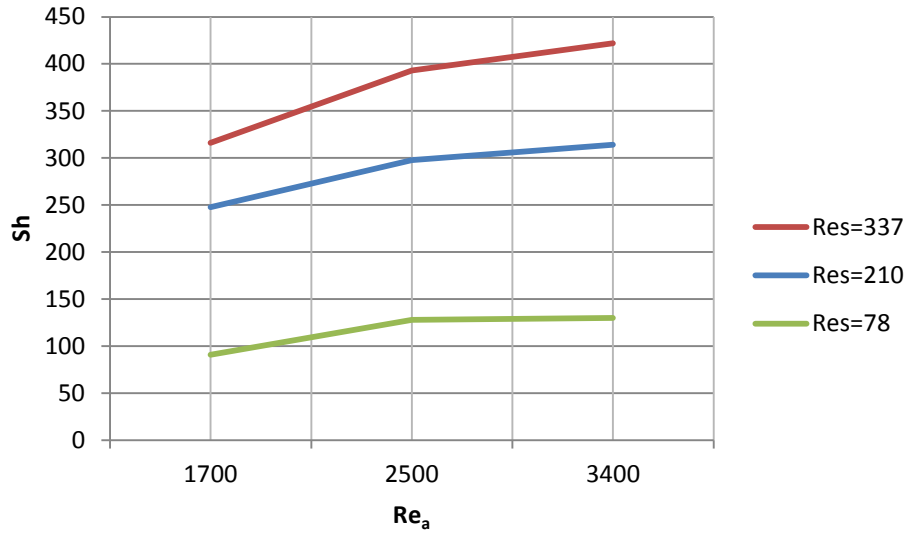
Yivli boruda ve referans düz boruda buharlaşan suyun kütleli debisinin kıyaslanması Şekil 5.20’de verilmiştir. Buharlaşan su debisinin besleme debisine oranı yivli boru ile referans düz borunun karşılaştırma grafiği Şekil 5.21’de verilmiştir. Buharlaşma oranının, referans düz boruda yivli boruya göre yaklaşık %25 düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 20 Referans düz boru ile yivli boruda buharlaşan su miktarı ($T_{bes}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Şekil 5. 21 Referans düz boru ile yivli boruda buharlaşma oranı ($T_{bes}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

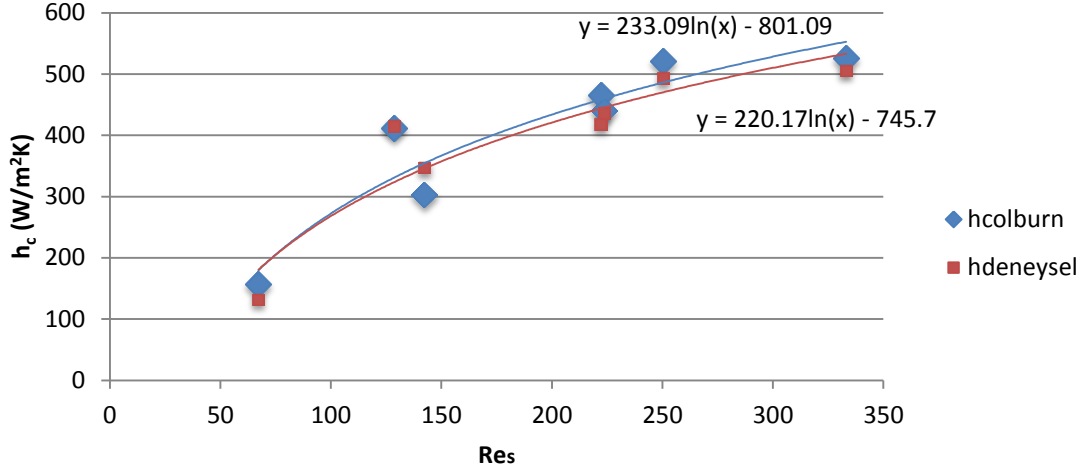


Şekil 5. 22 Yivli boruda farklı hızlarda farklı sıcaklıklarda Sh sayısının değişimi

Deneysel bulgular kullanılarak elde edilen boyutsuz parametreler incelenecek olursa, Sh sayısının farklı zorlanmış taşınım koşullarında yani artan hava hızı ile birlikte arttığı Şekil 5.22’de görülmektedir. Havanın reynolds sayısının 1700 olması durumunda Sh sayısının yaklaşık 100-300 aralığında, havanın reynolds sayısının 2500 olması durumunda yaklaşık 130-400 aralığında, havanın reynolds sayısının 3400 olması durumunda Sh sayısının yaklaşık 140-450 aralığında değiştiği saptanmıştır.

5.4 Colburn Eşitliği ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması ve Akış Tipi Grafiği

Deneysel bulgular ile belirlenen ısı taşınım katsayıları ile deneysel bulgulardan colburn benzeşimi ile hesaplanan ısı taşınım katsayılarının karşılaştırması Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Örneğin, 1.5 m/s hava hızı ve 35 °C besleme suyu sıcaklığında yapılan deneylerin Colburn eşitliğine göre bulunan doğru denklemi $y = 233.09 \ln(x) - 801.09$ iken, deneysel ısı taşınım katsayılarının doğru denklemi $y = 220.17 \ln(x) - 745.7$ olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda tüm deneysel sonuçlardan Colburn eşitliği kullanılarak ısı taşınım katsayıları belirlenmiştir. Colburn denkleminin deneysel sonuçları $\pm\%5$ kadar yakınsadığı görülmektedir.



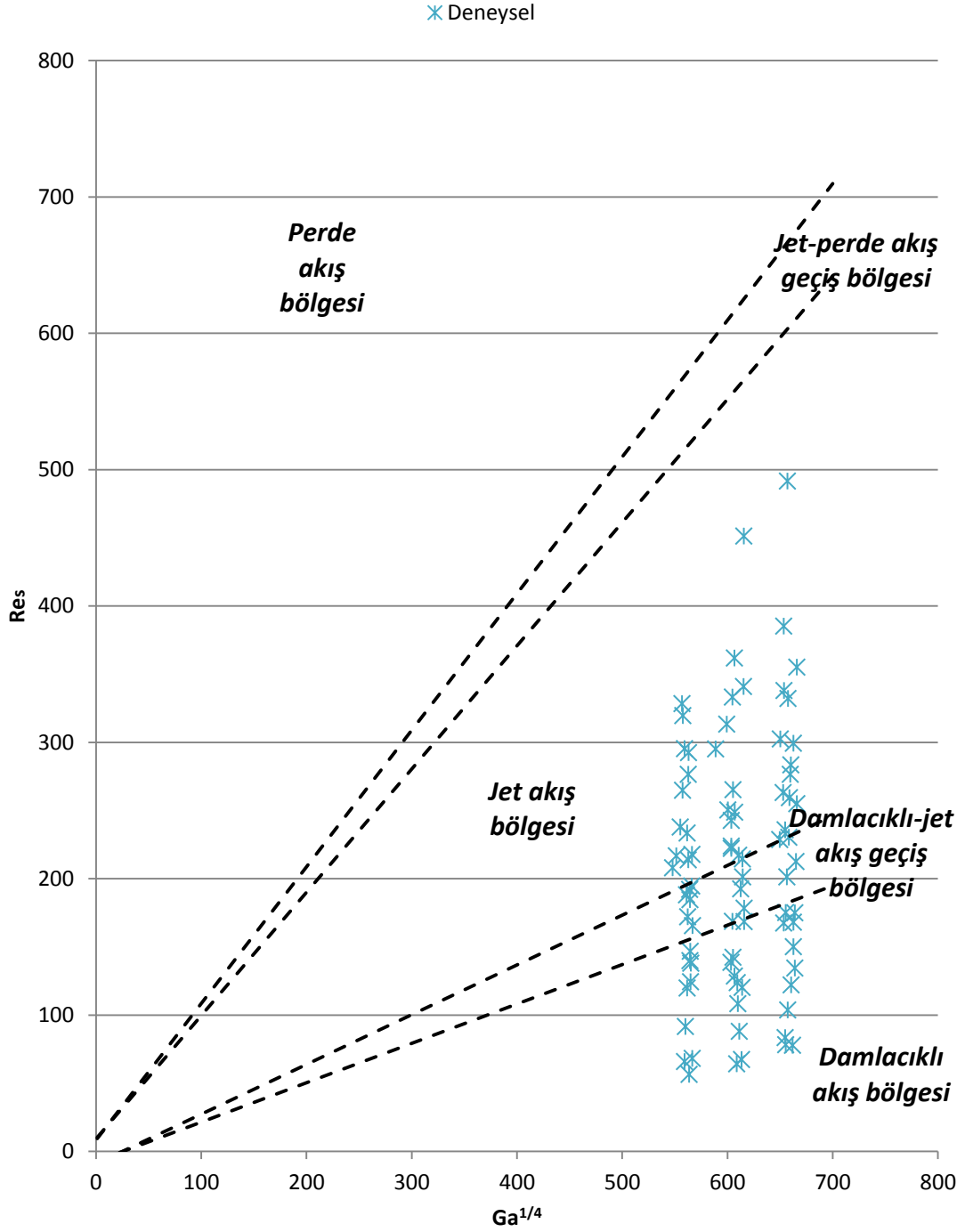
Şekil 5. 23 Colburn eşitliği ile deneysel bulguların karşılaştırılması

Yapılan yivli boru testleri boyunca belirlenen su debilerine bağlı olarak, film akışının Re sayısı belirlenmiştir. Bu deneylerin hepsi, modifiye edilmiş Galileo sayısı ve Reynolds sayısı kullanılarak akış tiplerini içeren şablonda Şekil 5.24’de görüldüğü üzere belirlenmiştir. Yapılan deneyler incelendiğinde düşük su debilerinde damlacıklı akış elde edilirken, yüksek debilerde jet akış gözlemlenmiştir. Tüm deneyler boyunca damlacıklı, damlacıklı-jet, jet akışları gözlemlenirken, jet-perde ve perde akış gözlemlenmemiştir. Çünkü çalışmanın amacı, farklı yiv geometrilerine sahip borularla minimum su debisiyle maksimum ısı ve kütle transferi sağlanması olduğundan deneyler düşük su debilerinde (Re_s maksimum 500) yapılmıştır. Deney şartlarındaki $Ga^{1/4}$ değerlerinde, bu Reynolds sayılarında perde akışa geçiş ya da perde akış söz konusu değildir.

5.5 Eş Zamanlı Kütle ve Isı Transferinin Gerçekleştiği Farklı Zorlanmış Taşınım Koşulları için Nu Korelasyonu

Deneysel bulgulardan, öncelikle 4 bilinmeyenli denklem ile regresyon eğrisi çıkarılmıştır. Bu korelasyonlar farklı hız değerleri için belirlenmiştir. Sonrasında ise yivli boru da yapılan tüm deney sonuçlarını içeren, genel korelasyon denklemi üstel fonksiyon olarak ifade edilmiştir.

1.5 m/s hava hızı olduğu durumdaki korelasyon aşağıda ifade edilen denklem ile belirlenmiştir. Korelasyonda bulunan a sabiti 7.57, b sabiti -19513, c sabiti 1.24 ve d

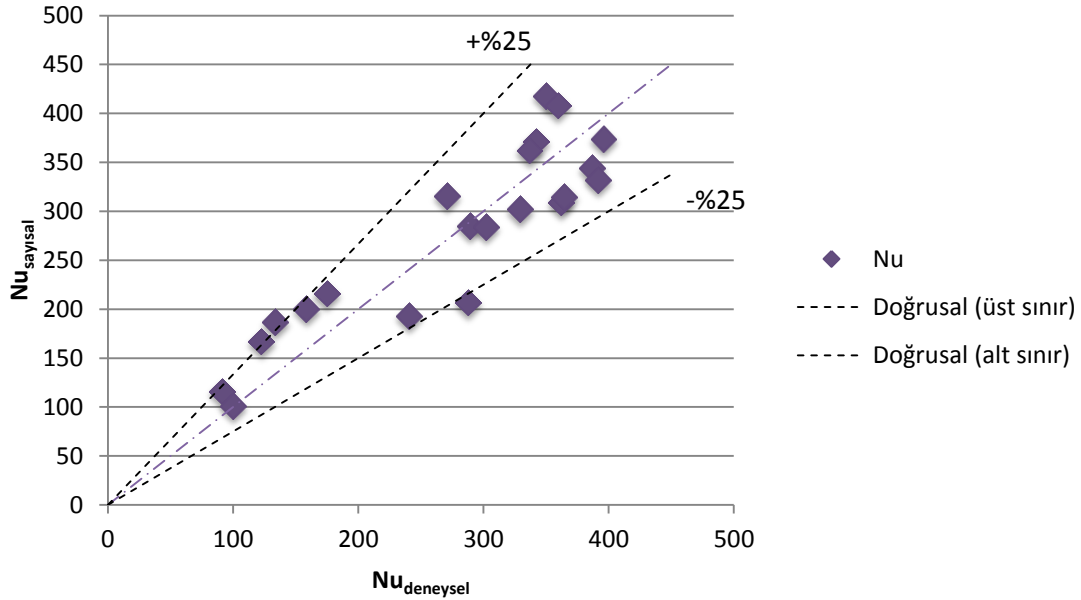


Şekil 5. 24 Akış tiplerini içeren şablonda [19] deneysel sonuçların belirlenmesi

sabiti 33.25'dir. Regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.82'dir. Nu denklemleri, besleme suyu sıcaklığına, havanın Re sayısına, Prandtl sayısına, su filminin Reynolds sayısına bağlıdır. $Nu=f(Re_a, Pr, Re_s, T_{bes})$ şeklinde ifade edilmiştir.

$$Nu = a Re_a + b Pr + c Re_s + d T_{bes} \quad (5.1)$$

Korelasyonun sayısal değeri ile deneysel sonuçlar Şekil 5.25’de karşılaştırılmıştır. $Nu_{sayısal}$ sonuçlarının, $Nu_{deneysel}$ sonuçlarla maksimum ± 25 hata payı ile uyumlu olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 25 Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (1.5 m/s)

Hava hızının 3 m/s olduğu durumdaki korelasyon denklem 5.2 de ifade edilmiştir. Korelasyonda, a sabiti 2.86, b sabiti -14672, c sabiti 1.54 ve d sabiti 23.86’dir. Regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.89’dur.

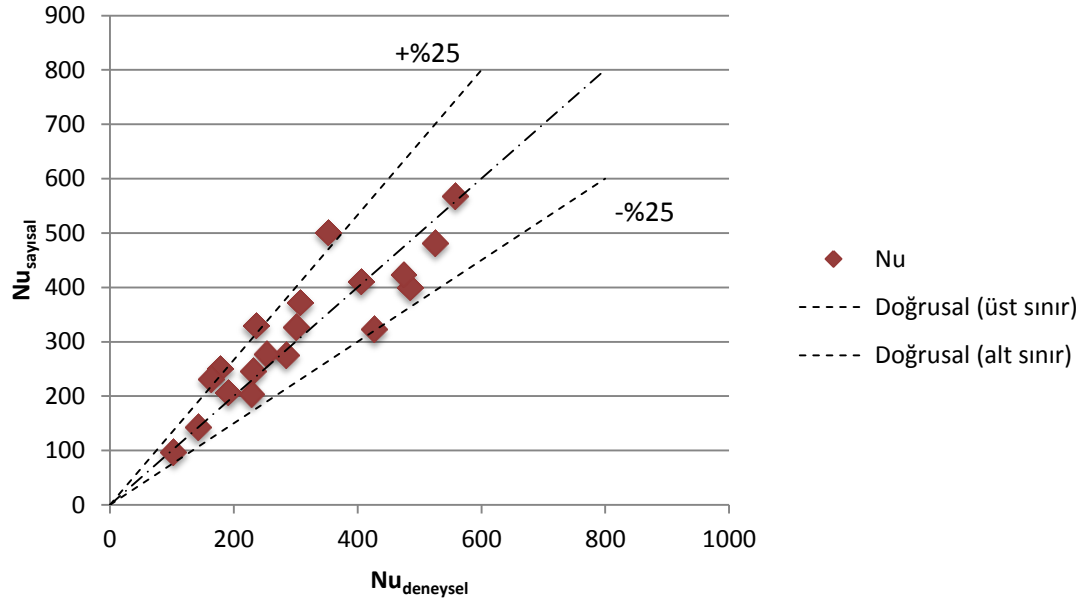
$$Nu = a Re_a + b Pr + c Re_s + d T_{bes} \quad (5.2)$$

Korelasyonun sayısal değeri ile deneysel sonuçlar Şekil 5.26’da karşılaştırılmıştır. $Nu_{sayısal}$ sonuçlarının, $Nu_{deneysel}$ sonuçlarla maksimum ± 25 hata payı ile uyumlu olduğu şekilden anlaşılmaktadır.

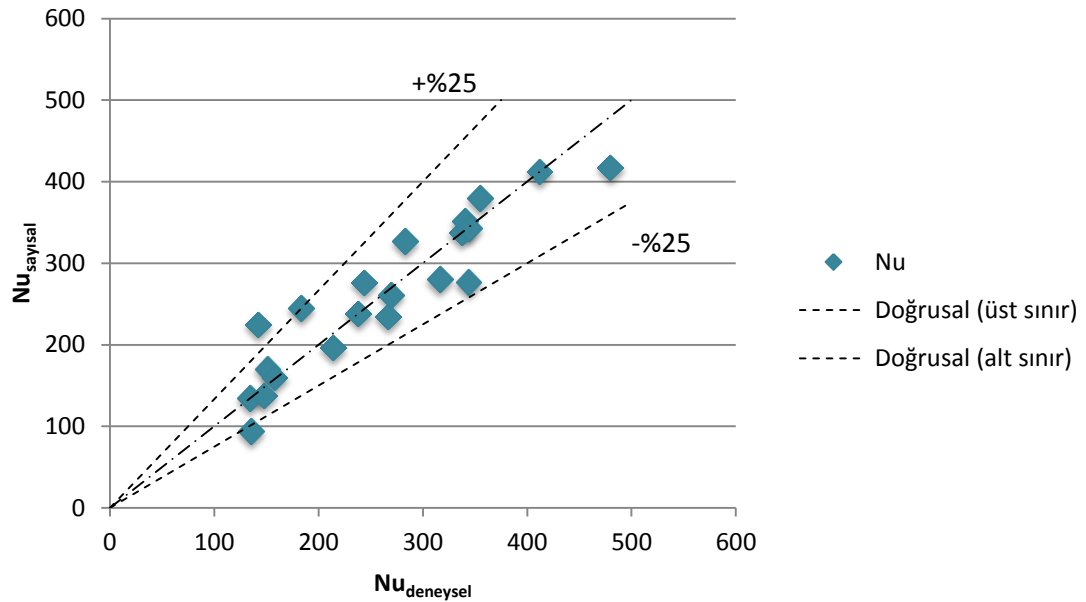
Hava hızının 2.2 m/s olduğu durumdaki korelasyon denklem 5.3 de ifade edilmiştir. Korelasyonda a sabiti 0.18, b sabiti -625, c sabiti 1,14 ve d sabiti 1.40’dır. Regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.86’dır.

$$Nu = a Re_a + b Pr + c Re_s + d T_{bes} \quad (5.3)$$

Korelasyonun sayısal değerleri ile deneysel sonuçlar ekil 5.27’de karşılaştırılmıştır. $Nu_{sayısal}$ sonuçlarının, $Nu_{deneysel}$ sonuçlarla maksimum $\pm 25\%$ hata payı ile uyumlu olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 26 Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (3 m/s)



Şekil 5. 27 Yivli boru deneysel verilerinin korelasyon ile karşılaştırılması (2.2 m/s)

5.6 Eş Zamanlı Kütle ve Isı Transferi Gerçekleşen Durumlarda Genel Nu ve Sh Korelasyonu

Genel Nu ve Sh denklemleri, havanın Re sayısına, Prandtl sayısına ya da Sc sayısına ve düşen su filminin Re sayısı değişkenlerine bağlıdır. $Nu_g = f(Pr, Re_a, Re_s)$ şeklinde ifade edilmiştir.

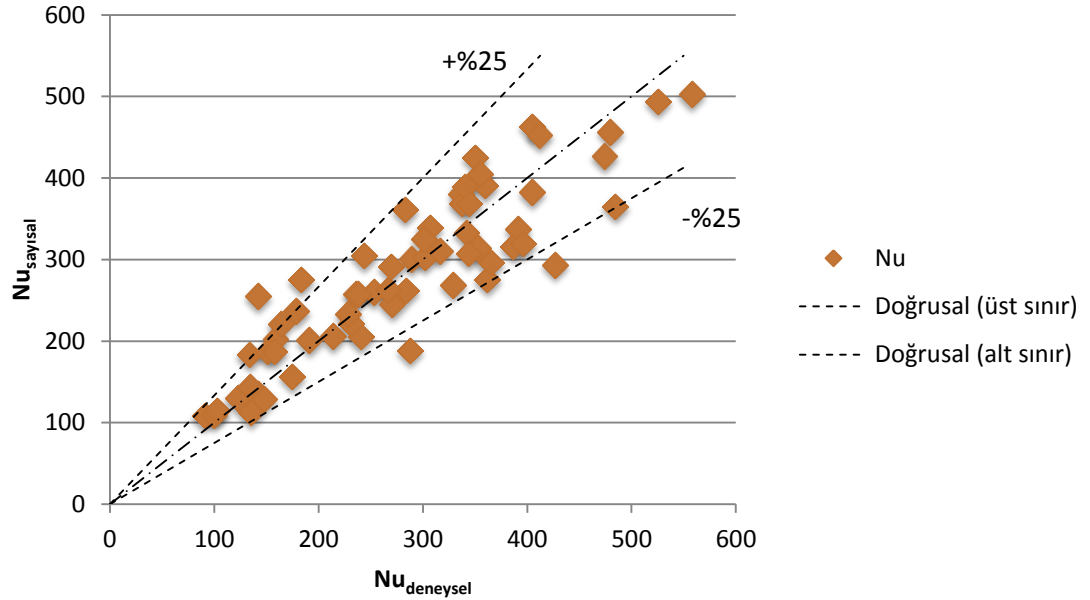
Korelasyon aşağıda ifade edilen denklem ile belirlenmiştir ve sabitlerden, a sabiti 1.9778, b sabiti 0.15646 ve c sabiti 0.73441'dür.

$$Nu_g = a (Pr)^{1/3} (Re_a)^b (Re_s)^c \quad (5.4)$$

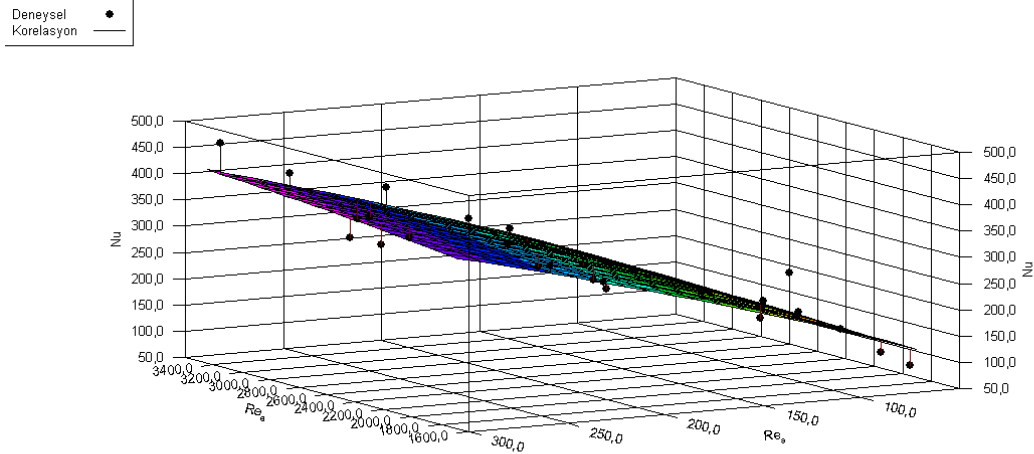
Bu korelasyonun çalışma aralığı T_{bes} sıcaklığına, Re_s ve Re_a 'a bağlı olarak Çizelge 5.1'de verilmiştir. Korelasyonun sayısal değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır ve $\pm\%25$ doğrulukta olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.28 ve Şekil 5.29).

Çizelge 5. 1 Nu korelasyonunun çalışma aralığı

	$T_{bes} (^{\circ}C)$	$Re_s (-)$	$Re_a (-)$	$Pr (-)$
Nu_g	30...40	50...350	1500...3500	0.7213

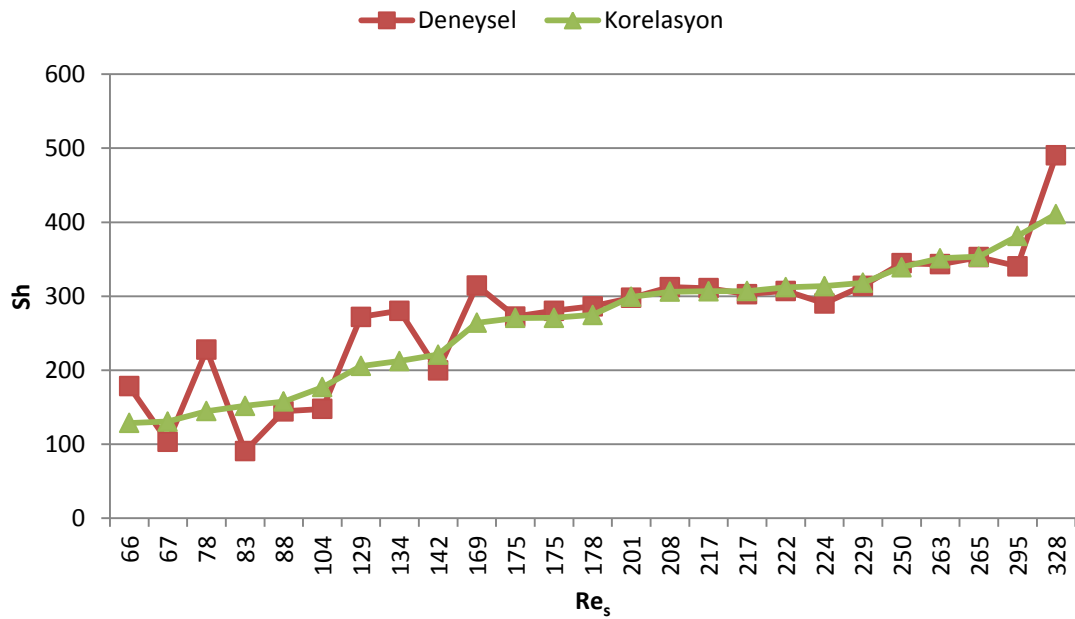


Şekil 5. 28 Yivli boru korelasyon verilerinin (Nu) hata analizi



Şekil 5. 29 Yivli boru deneysel verilerinin (Nu) korelasyon ile karşılaştırılması

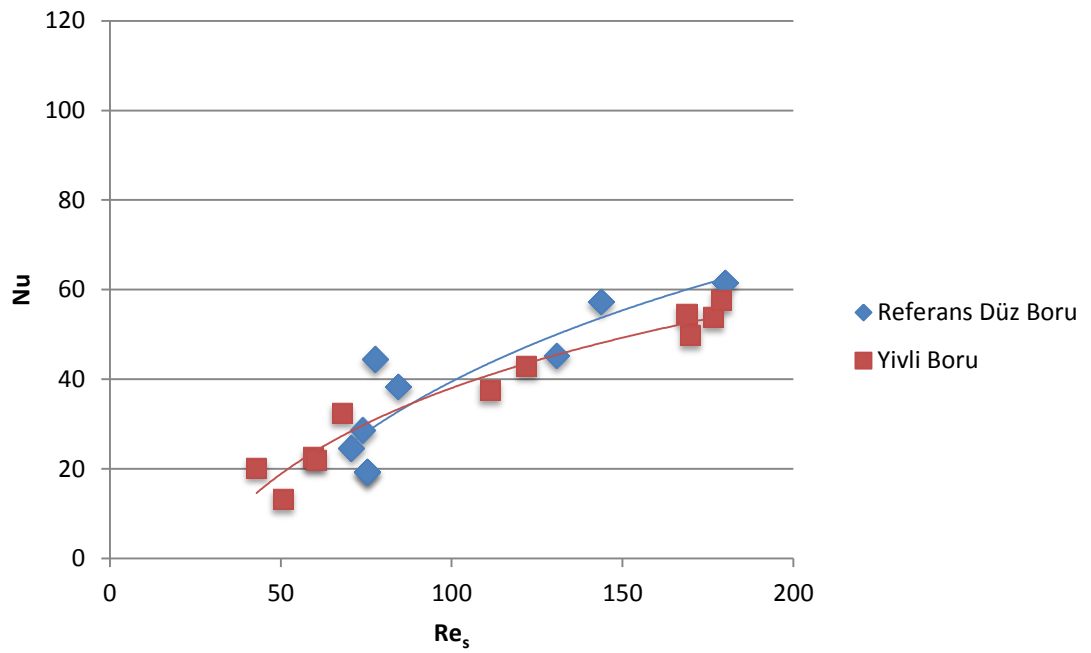
Bu korelasyondaki Nu sayısı yerine Sh, Pr sayısı yerine Sc sayısı konularak ısı-kütle taşınım benzeşiminden Sh sayısı hesaplanabilmektedir. Aynı şekilde yivli boru için hesaplanan bulgular ile benzeşim sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmıştır ve Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 30 Deneyisel ve ısı-kütle benzeşimi sonucunda belirlenen (Sh) değerlerinin karşılaştırılması

5.7 Düşen Su Filmi Akışı için h_{ff} (W/m^2K) Taşınım Katsayılarının ve Nu değerlerinin Belirlenmesi

Bölüm 1.1’de belirtilen formülasyonlar yardımıyla hesaplanan h_{ff} (W/m^2K) taşınım katsayısı, deneysel olarak belirlenmiştir. Mevcut deneylerde düşen su filminin Re sayısı minimum 50’dir. Şekil 5.31’de yivli boru ve referans düz boru için düşen su filminin taşınım katsayılarına bağlı olarak hesaplanan Nu değerlerinin, su filminin Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Referans düz boruda daha yüksek taşınım katsayıları gözlemlenmektedir ve bu yüzden Nu değerleri maksimum %15 oranında fazladır.



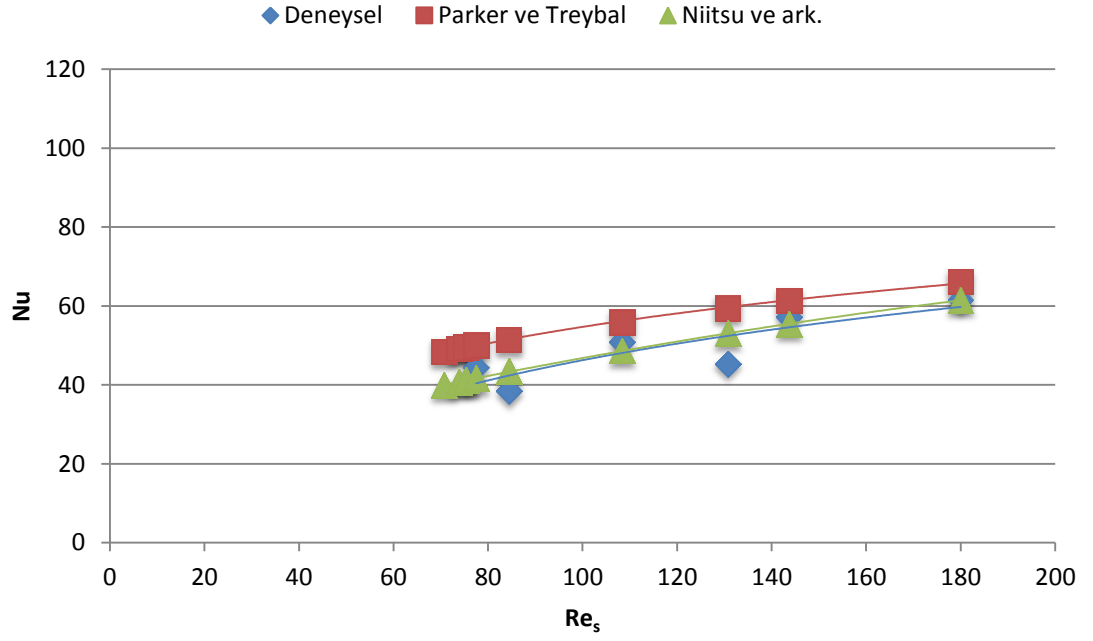
Şekil 5. 31 Yivli ve referans düz boruda düşen su filminin Nu değerlerinin, su filminin Reynolds sayısına bağlı değişimi

Literatürde ki diğer çalışmalarla düşen su filmi için belirlenen h_{ff} (W/m^2K) taşınım katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Niitsu ve ark. [66], Parker ve Treybal [63] ‘un korelasyonları kullanılarak aynı şartlarda ki düşen su filminin taşınım katsayısı değerleri Şekil 5.32’de gösterilmiştir.

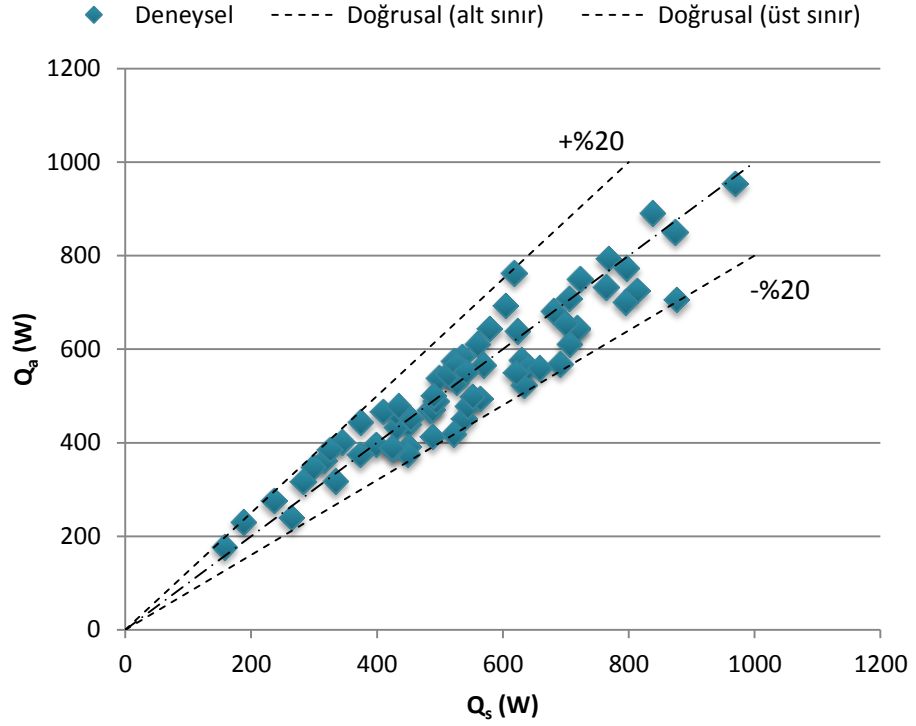
5.8 Termodinamiğin Birinci Kanununun Uygulanması

Düşen su filmi olan ve hava akışının olduğu durum için yani eşzamanlı ısı ve kütle transferinin gerçekleşmesi halinde, deneysel çalışma sonuçlarının I. Yasa analizi

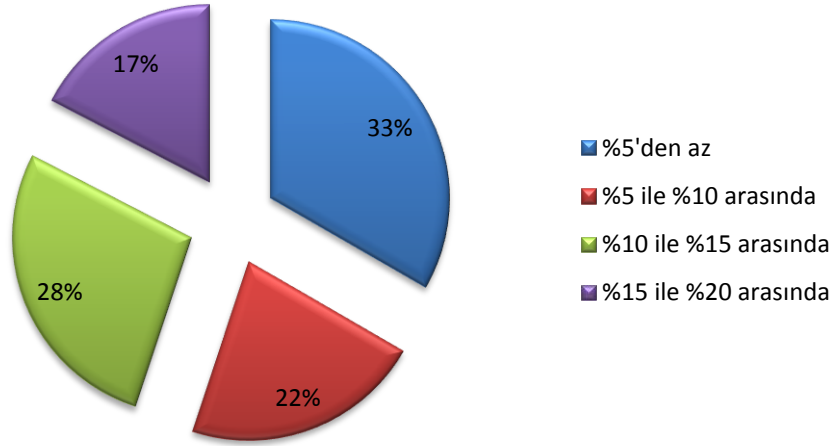
yapılmıştır. Sonuçlar, deneysel olarak elde edilen bulguların ± 20 hata ile enerji korunumu denklemlerini doğruladığını göstermektedir.



Şekil 5. 32 Düşen su filmi için belirlenen Nu sayılarının literatür ile karşılaştırılması



Şekil 5. 33 Deneysel çalışmanın birinci yasa analizi sonucunda Q_s , Q_a değerlerinin ± 20 hata yüzdesi



Şekil 5. 34 Birinci yasa analizi sonucunda bulunan fark oranına bağlı olarak deneysel çalışmanın yüzdesel dağılımı

Γ (kg/m.s) birim boyda ki besleme suyu debisine bağlı olarak yapılan deneylerin I. yasa analizinde, Bölüm 3.5'de belirtilen denklemler yardımıyla Q_s ve Q_a hesaplanarak, karşılaştırma grafiği Şekil 5.34'de verilmiştir. Aynı zamanda, Şekil 5.34 üzerinde yüzdesel hata çubukları ($\pm\%20$) gösterilmiştir. Yapılan I. yasa analizi sonucunda yüzdesel dağılım olarak fark oranının tüm deneylerdeki değişimi %5'den az, %5 ile %10 arasında, %10 ile %15 arasında ve %15 ile %20 arasında olmak üzere 4 farklı aralıkta Şekil 5.35'de verilmiştir. Deneylerin büyük kısmının %10'un altında bir hata oranına sahip olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 6

SAYISAL ÇALIŞMALAR

Burgulu trapez yivli ve referans düz borunun sayısal çözümlemesi Ansys 14 Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıyla yapılmıştır. Bu bölümde öncelikle Ansys 14 Fluent CFD programında kullanılan hesaplama yöntemleri ve ele alınan problem için oluşturulan çözüm algoritması açıklanmıştır.

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği piyasasında en çok kullanılan yazılımlardan biridir. Ansys 14 programı içerisinde çalışma alanında gerekli tanımlamalar yapıldıktan sonra, Design Modeler programı ile modellerin çizimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında, Mesh Modeler programında çizilen modelin çözüm ağı tasarımı yapılmıştır. Referans düz boruda ve yivli boruda oluşturulan çözüm ağı kullanılarak, Ansys Fluent ile sayısal çözümden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

6.1 Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri

Bu çalışmada, sayısal çözümleme için Ansys 14 Fluent programı kullanılmıştır. Bu bölümde programda kullanılan çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilecektir [82].

6.1.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri

6.1.1.1 Ayırık Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)

Bu yöntem, süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini yakınsama gerçekleştiği zamana kadar ayrı olarak çözer. Daha çok sıkıştırılamaz akışkanların bulunduğu

ortamlarda tercih edilir. Akışkan fiziksel özellikleri, bir önceki iterasyondan elde edilen sıcaklık dağılımları yardımıyla yeniden hesaplanarak belirlenir. Eğer hesaba yeni başlanıyor ise akışkanın giriş sıcaklığındaki fiziksel özellikleri hesaplanır. x , y , z yönlerindeki u , v , w hız değerlerine ait momentum denklemleri, o anki basınç ve yüzey akısı yardımıyla çözülür.

Hesaplamalarda bulunan hız değerleri, süreklilik denklemini sağlamıyorsa, süreklilik ve lineer edilmiş momentum denklemleri yardımıyla, basınç düzeltmesi denklemi türetilir. Bu denklem hız-basınç dağılımları için gerekli düzeltmeyi elde edebilmek ve kütsel debi, süreklilik denklemini sağlaması için çözülür.

6.1.1.2 Bir Arada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver)

Süreklilik, momentum, uygun olması durumunda enerji, kütle transferi denklemleri ile eş zamanlı çözülür. İterasyonlarda akışkan özellikleri bir önceki iterasyondan güncellenir. Başlangıçta ise giriş değerleri kullanılır. İterasyonlarda süreklilik, momentum, enerji ve kütle denklemleri eş zamanlı çözülür. Her iterasyon sonucu yakınsama kriterlerine göre yakınsama kontrol edilir. Yakınsama gerçekleşmez ise iterasyon devam ettirilir. Ayrı çözüm yönteminde, bir arada çözüm yöntemine göre daha kısa sürede çözüme ulaşılmaktadır.

6.1.1.3 Lineerleştirme Yöntemleri

Sayısal çözüm yöntemlerinden ayrı çözüm ve bir arada çözüm yöntemlerinde farklı lineer olmayan denklemleri her hücre için bağımlı değişkene ait denklemler sistemi oluşturmak üzere lineerleştirir. Bulunan lineer denklemler, güncellenmiş akış alanı elde etmek için çözümlenir. Bu lineerleştirme bağımlı değişkene göre örtülü veya açık olarak gerçekleştirilebilir.

6.1.1.4 Örtülü Yöntem (Implicit Formulation)

Her hücrede bilinmeyen değerler, komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerler yardımıyla hesap edilir. Bununla birlikte her bir bilinmeyen değere ait, sistemde birden fazla denklem ortaya çıkar ve bu denklemler bilinmeyenleri tespit edebilmek için eş zamanlı olarak çözülür.

6.1.1.5 Açık Yöntem (Explicit Formulation)

Verilen bir değişkenin, hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen sadece bir denklemde yer alır ve her hücredeki bilinmeyenler bir an için çözülür.

Ayrı çözüm yöntemi sadece örtülü yöntem ile lineerleştirmeye müsaade eder. Ama bir arada çözüm yönteminde örtülü veya açık yöntem kullanılabilir. Bir arada çözüm ve örtülü çözümde P, u, v, w ve T değerleri tüm hücrelerde aynı anda çözülür. Bir arada çözüm ve açık yöntemde P, u, v, w ve T değerleri bir hücrede aynı anda çözülür.

Fluent'in çözüm yöntemleri içerisinde momentum ve enerji için değişik enterpolasyon teknikleri mevcuttur. Bunlar aşağıda belirtilen yöntemlerdir.

- First Order: Birinci dereceden,
- Second Order: İkinci dereceden,
- Power Law: Üssel,
- Quick: Hızlı enterpolasyon

Fluent bunları her bir hücre merkezi için farklı skaler ϕ değeri bulabilmek için kullanır.

$$\phi_f a_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (6.1)$$

Denklem 6.1 eşitliğindeki ϕ_f 'yi merkez değerlerden enterpolasyon ile bulur.

6.1.2 İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi

Hücre yüzeyindeki değişkenler, lineer yeniden yapılandırma yaklaşımı yöntemi kullanılarak çözülür. Yüzey değerleri ϕ_f Taylor serisi yardımıyla;

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \Delta S \quad (6.2)$$

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \phi_f A \quad (6.3)$$

ikincil enterpolasyon yöntemi yüksek derecede güvenilirlik sağlar. Burada ΔS bir önceki hücre merkezi ile bundan bir sonraki hücre yüzey merkezi arasındaki yer değişim vektörü, $\nabla \phi$ ise ikisi arasındaki ϕ 'nin değişim miktarıdır.

6.1.3 Basınç-Hız Çifti İçin Simple Metodu

Momentum, süreklilik ve diğer skalerlere ait denklemlerin çözüm algoritması aşağıdaki gibidir:

- Tahmini basınç değerleri P^* belirlenir.
- Tahmini basınçtan tahmini hız u^*, v^*, w^* değerleri bulunur.
- Bulunan bu hız denklemleri ile süreklilik denklemindeki basınç düzeltme değerleri hesaplanır.
- Düzeltme değerleri ile gerçek basınç hesaplanır.
- Gerçek u, v, w hız değerleri bulunur.
- Akışın türbülanslı olması durumunda u, v, w hız değerleri yardımıyla türbülans denklemleri çözülür.
- Sıcaklık değerleri de yukarıda anlatılan yöntemle sırayla bulunur.
- Akışkan özellikleri bulunan sıcaklık değeri ile düzeltilir.
- R artık değeri hesaplanır. Kullanıcının ayarlayabildiği R değerine göre karşılaştırma yapılır. Bulunan değer, ayarlanan değerden büyük ise iterasyon devam eder. Aksi halde iterasyon sonlandırılır. Bir sonraki iterasyon yapılırken en son bulunduğu basınç değeri, başlangıç basıncı olarak kabul edilir ve işlemler tekrarlanır.

6.1.4 Artık Değer (Residual)

P hücresi için ϕ değeri;

$$a_p \phi_p = \sum a_n \phi_{nb} + b \quad (6.4)$$

$$S = S_c + S_p \phi \quad (6.5)$$

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} + S_p \quad (6.6)$$

İlk yazılan denklemde eşitliğin sağlanması gerekir ancak iterasyon sırasında eşitliğin sağ ve sol tarafı farklı olabilir. İki taraf arasındaki farkın tüm P hücreleri boyunca olan toplam değerine ϕ değişkeninin artık R^ϕ değeri adı verilir.

$$R^{\emptyset} = \sum_{P_{hücreleri}} |\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p| \quad (6.7)$$

Bu formül ile yakınsamanın olup olmadığını anlamak zordur. Bu nedenle boyutsuzlaştırma yapıp boyutsuz artık değeri (Residual) aşağıdaki şekilde bulunur;

$$R^{\emptyset} = \frac{\sum_{P_{hücreleri}} |\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p|}{\sum_{P_{hücreleri}} |a_p \phi_p|} \quad (6.8)$$

Momentum denklemlerinde paydadaki $a_p \phi_p$ yerine $a_p V_p$ gelir. Süreklilik denklemi için net kütle üretimi değeri;

$$R^c = \sum_{P_{hücreleri}} |P \text{ hucresindeki kütle üretimi}| \quad (6.9)$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri;

$$R^{\emptyset} = \frac{R^c \cdot N.iterasyon}{R^c \cdot 5.iterasyon} \quad (6.10)$$

Paydadaki değer ilk beş iterasyondaki en büyük mutlak değer olarak artık $R^{\emptyset}$ 'dir.

6.1.5 Yakınsama ve Kararlılık

Fluent programında yakınsama kriterleri; süreklilik, x,y,z yönlerindeki hızlar için $R=10^{-3}$, enerji için $R=10^{-6}$ dir. Yakınsama kriterleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Yapılan nümerik çalışmada yakınsama değerleri süreklilik ve enerji için $R=10^{-6}$, x,y,z yönlerindeki hızlar için ise $R=10^{-3}$ alınarak hesaplanmıştır.

Bu kriterlere göre iterasyon sayısı referans düz boru ve yivli boru çözümlemelerinde 1000 - 5000 aralığında değişmektedir. Yakınsama kriterlerinin sağlanmasından sonra, yakınsama eğrilerinin yataylaşması için iterasyon devam ettirilmiştir. Çözüm sonuçlarının daha doğru olması, sistemin kararlı hale gelebilmesi için yapılan bu işlem, eğrilerin yataylaşması durumunda sonlandırılmıştır.

6.1.6 Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma

- “Design Modeler” ’da girilen ölçülerin birimi tanımlanır.
- Çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- “Design Modeler” ’da çizilen model “Ansys ICEM CFD” ’e aktarılır ve program çalıştırılarak çözüm ağı oluşturulur.

- Çözüm ağı gerçekleştirilirken yapılan küçük parçalara bölme işleminde gerekli modifikasyonlar gerçekleştirilir.
- Ansys Fluent çalıştırılır ve Paralel / 3D çözüm yöntemi seçilir.
- Energy komutu aktif hale getirilerek, enerji korunumu denklemlerinin sayısal çözümü sağlanır.
- Laminer akım için çözüm modeli seçilir.
- Karışım su buharı ve hava olarak tanımlanır.
- Karışım seçilerek tanımlamalar yapılır.
- Yerçekimi terimi aktif duruma getirilerek değeri akışa dik yönde vektörel olarak girilir.
- Sınır şartları girilir.
- URF (Under Relaxation Factors) olarak programda tanımlanan düzeltme katsayıları ve parçalara ayırma yöntemleri girilir. URF değerleri: Basınç: 0.3, Yoğunluk: 1, Gövde kuvvetleri: 1, Momentum: 0.7, Enerji: 1 olarak girilmiştir. Parçalara ayırma yöntemlerinden, basınç-hız çifti: SIMPLE, Basınç: Standart, Momentum: İkinci dereceden, Enerji: Birinci dereceden seçilmiştir.
- Yazım-çizim ayarları yapılır.
- Yapılan bütün ayarlar ve girilen bütün değerler kaydedilir.
- Hesaplanmış değerler varsa sıfırlanır ve başlangıç ayar konumlarına getirilir.
- İterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.

Sayısal çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations) methodu tercih edilmiştir. Bu metot kararlı akış için uygun bir yöntemdir. SIMPLEC (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations Consistent) metodu da kararlı akış çözümünde kullanılır. Ama URF (düzeltme katsayısı)'nın 1 alındığı problemlerde, çözümün yakınsamamasına neden olabilmektedir. PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) metodu kararsız akışlarda kullanılan bir çözüm yöntemi olup, tercih edilmemiştir.

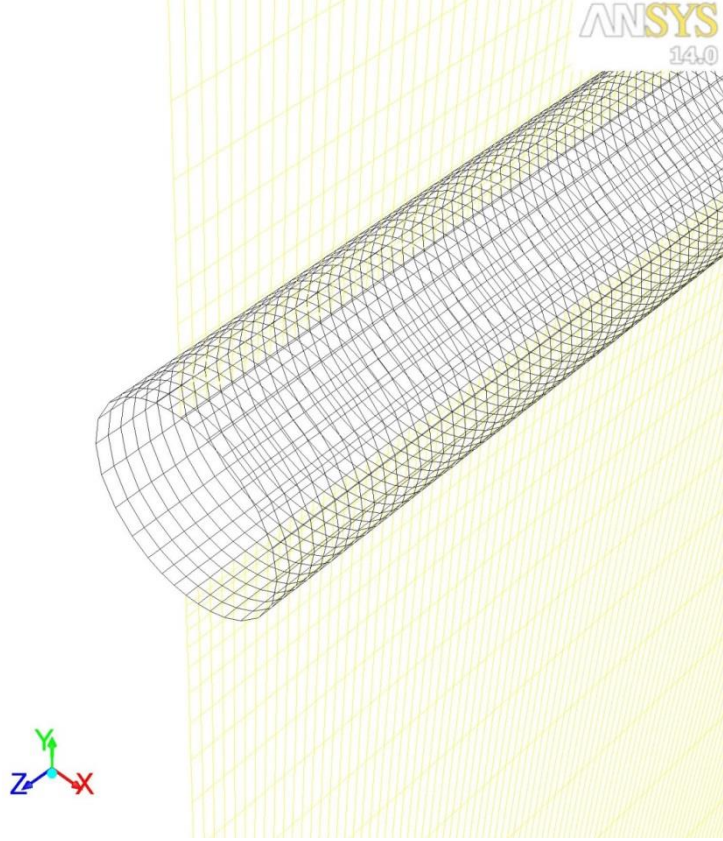
Çizelge 6. 1 Referans düz boru için çözüm ağıının belirlenmesi

Çözüm ağı no	Çözüm ağında kullanılan bölme sayısı	Sayısal sonuçlar		
		h (W/m ² K)	T _y (°C)	Nu (-)
1	5	19.15	45.84	13.23
2	10	21.20	43.99	14.65
3	15	22.99	42.70	15.89
4	20	23.73	42.42	16.40
5	25	24.34	42.16	16.82
6	30	24.46	42.03	16.90
7	35	25.30	41.63	17.48
8	40	25.18	41.81	17.40
9	45	25.01	41.71	17.28
10	50	25.58	41.36	17.68
11	100	25.78	41.20	17.81
12	500	25.68	41.37	17.74

Yakınsamanın gerçekleştiğini anlamak için Residual (artık) değerlerine bakılır. Her iterasyondan sonra kontrol gerçekleşir.

$$R^{\emptyset} = \frac{R_{\emptyset}^n}{R_{\emptyset}^5} \leq 10^{-3} \quad (6.11)$$

n. iterasyondaki artığın, ilk beş iterasyondaki maksimum artığa oranı 10^{-3} değerinden küçük olmalıdır. Süreklilik x, y, z koordinatlarındaki u, v, w hızlarının artık oranları 10^{-3} 'den ve enerji denklemindeki artık oranı da 10^{-6} 'dan küçük olmalıdır. Bu değerler Fluent programı tarafından tavsiye edilen değerlerdir. Yapılan çözümlemelerde bu değerlerin de altına inilmiş ve yakınsama eğrilerinin yataylaşması beklenerek çözümleme sonlandırılmıştır.



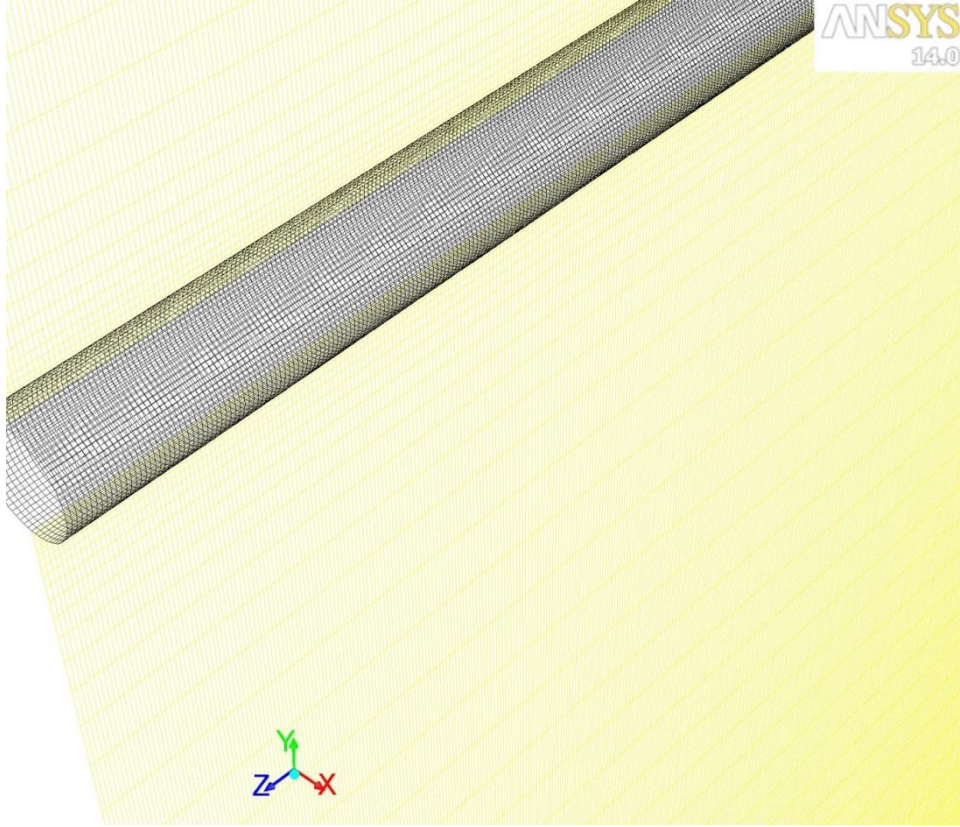
Şekil 6. 1 Çözüm ağı'nın (5 bölmeli) boru yüzeyinde görünümü

6.2 Çözüm Ağı Kontrolü

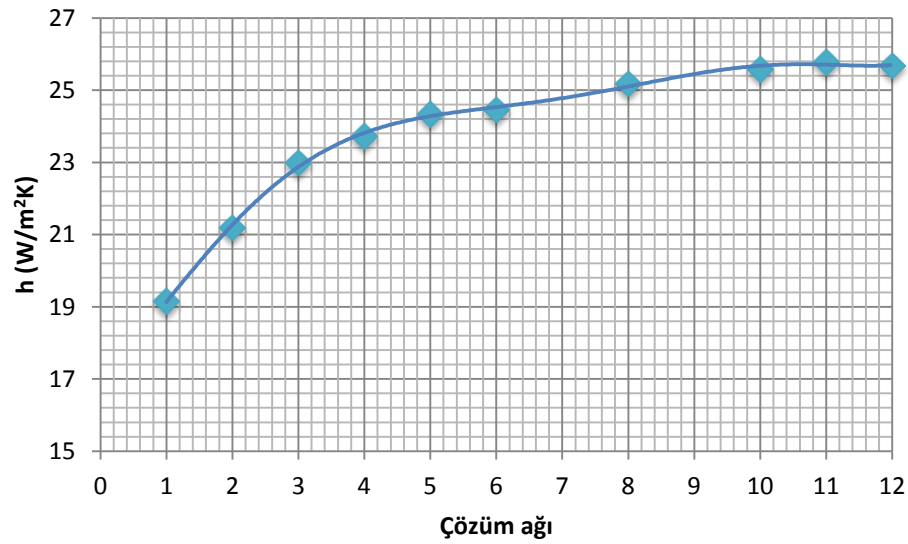
Ansys ICEM CFD programında çözüm ağı oluşturulurken, çözüm ağı'nın sık ya da gevşek olması kullanıcıya bağlıdır. Yerleştirilen çözüm ağı sayısı çözümün doğruluğu için önemlidir. Bu nedenle doğru çözüm ağı sayısının tespit edilmesi gereklidir. Bu çalışmada üç boyutlu yivli boru dışarısındaki akışın yiv boşluklarında ve boru yüzeyi sınır tabakasındaki etkilerini görebilmek için y yönünde seyrekleşen, z yönünde sıklaşan çözüm ağı yapısı tercih edilmiştir.

Çözüm ağı, boru yüzeyi boyunca ve aynı zamanda boruyu dik kesen sanal düzlem boyunca farklı sıklıklarda yerleştirilmiştir. Sarı renk ile Şekil 6.1 ve 6.2'de belirtilen sanal düzlemdeki ve boru yüzeyindeki çözüm ağı'nın bölme sayısı 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 100, 500 olarak değiştirilerek, boru yüzeyi boyunca 283 birim alandan 28300 birim alana kadar çözüm ağı üretimi gerçekleştirilmiştir. 5 bölmeli çözüm ağı'nın boru yüzeyindeki görünümü Şekil 6.1'de, 50 bölmeli çözüm ağı'nın boru yüzeyindeki görünümü ise Şekil 6.2'de gösterildiği gibidir. Çizelge 6.1'de çözüm ağı sayısının

belirlenmesi için Fluent programı yardımıyla referans düz boru için hesaplanan h değerleri, yüzey sıcaklık (T_y) değerleri ve Nu değerleri görülmektedir.



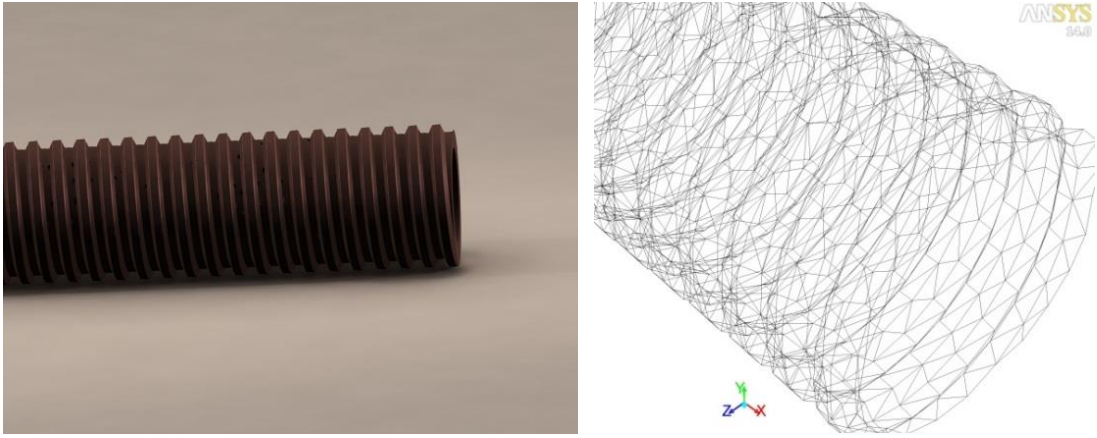
Şekil 6. 2 Çözüm ağının (50 bölmeli) boru yüzeyinde görünümü



Şekil 6. 3 Çözüm ağının etkinliğinin sayısal çözüme katkısı

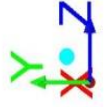
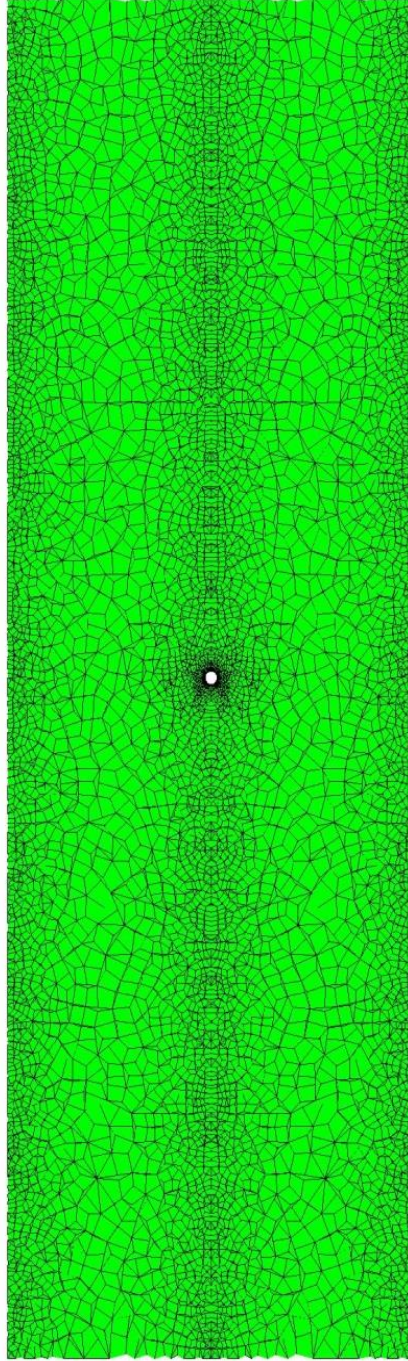
6.3 Modelin Çizimi ve Çözüm Ağının Oluşturulması

Design Modeler çizim programında yivli boru ve referans düz boru için üç boyutlu çizimler üzerinde çalışılmıştır. İki boyutlu çizimde x ve y koordinatlarında çalışıldığında, z koordinatındaki genişliğe bağlı olarak burgulu yivin yapısı değiştiğinden, sonuç alınamamaktadır. Bu yüzden x-y-z koordinatlarında üç boyutlu bir model tasarlanmış ve yüzeydeki burgulu yivin üzerindeki akışın yüzey sıcaklığına etkisi ve yüzey ısı taşınım katsayısı belirlenmiştir. Şekil 6.4’de Design Modeler da kullanılan burgulu trapez yivli borunun görünüşü ve Mesh Modeler’da kullanılan çözüm ağı görülmektedir.



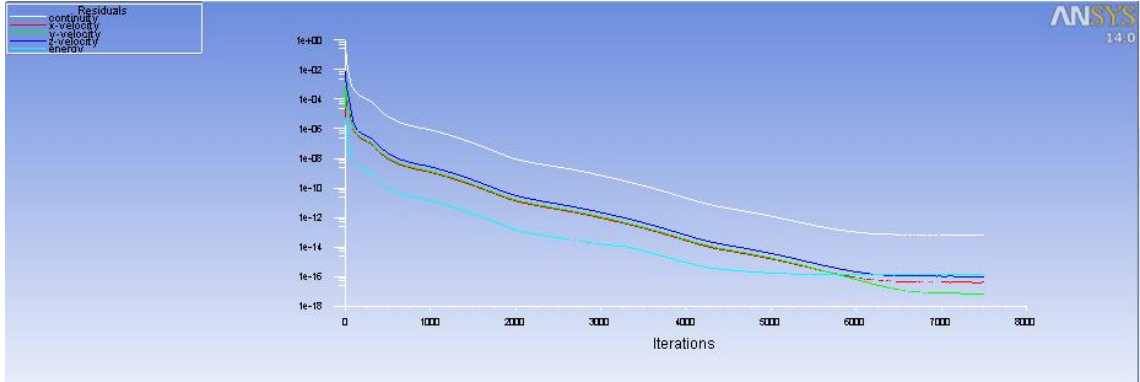
Şekil 6. 4 a) Burgulu trapez yivli boru modeli b) Kullanılan çözüm ağı

Yapılan sayısal analiz çalışmasında boru çevresindeki sınır tabaka ve boru dış yüzeyi incelendiğinden çözüm ağı referans düz boruda olduğu gibi sanal eksen düzlemi boyunca sık, akış bölgesinde, test hücresi giriş ve çıkışlarında ise daha seyrek olacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 6.5’de yivli boru için kullanılan çözüm ağının uzaktan görünümü y-z koordinatlarında gösterilmiştir. Burada da Şekil 6.4’de gösterilen yüzey çözüm ağının sıklığı, Şekil 6.5’de belli olmaktadır.



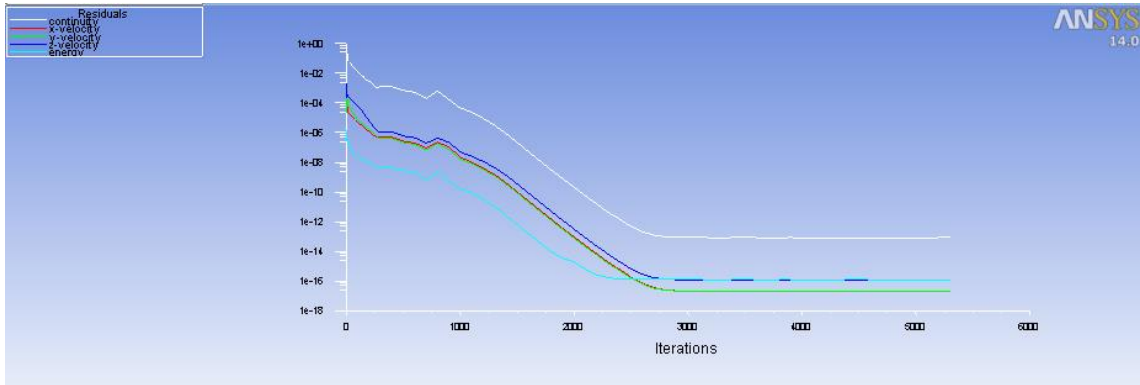
Şekil 6. 5 Çözüm ağıının uzaktan görünümü

6.4 Yivli ve Referans Düz Borunun Sayısal Çözüm Sonuçları



Şekil 6. 6 Referans düz borudaki yakınsaklık kriteri, 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi

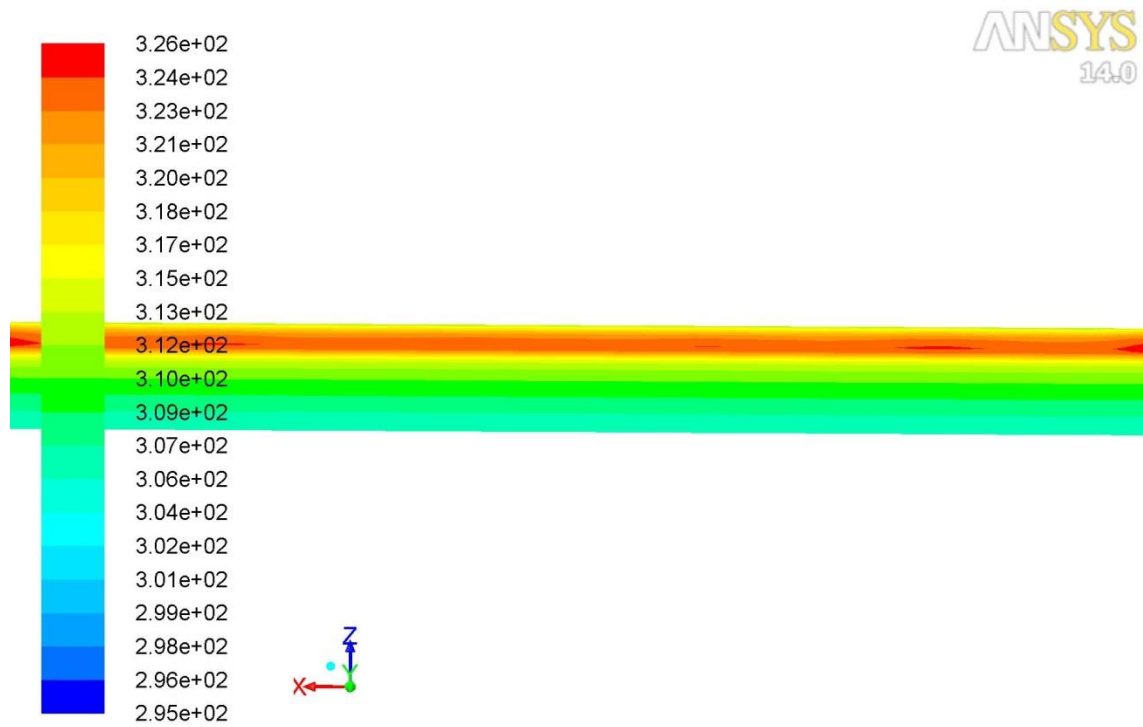
Referans düz boru çözümünde, 10 bölmeli çözüm ağında 3 saat içerisinde, 2000 iterasyon yaptırdıktan sonra ve 6000 iterasyon sonucunda yakınsama eğrilerinin yataylaştığı gözlenerek çözüm sonlandırılmıştır (Şekil 6.6). Yivli boru çözümünde ise yaklaşık 6 saat gibi bir sürede 5000 iterasyon yaptırılıp, yakınsama sağlanmış ve çözüm sağlamıştır (Şekil 6.7). Sabit ısı akısında, yüzeyin ortalama sıcaklığı, ısı taşıma katsayısı ve Nu değerleri karşılaştırma için Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6. 7 Yivli Borudaki yakınsaklık kriteri, 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi

Her iki boru için yapılan çizimler ayrı ayrı Fluent programında okutulup, aynı sınır koşulları girilerek çözüm yaptırılmıştır. Sabit ısı akısında ($Q_h = 418.56 \text{ W/m}^2$) boru yüzey sıcaklığı ortalaması referans düz boru ve yivli boru için belirlenmiştir. Ayrıca ortalama yüzey taşıma katsayısı, sayısal analiz programı yardımıyla belirlenmiştir. Sonuçları Çizelge 6.3’de gösterilmiştir. x-z koordinatlarında referans düz boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 6.8’de verilmiştir. Referans düz borunun sayısal çözümünde test hücresi

içinde uzaktan görünüşü ve test hücresinde yaklaşarak borunun test hücresi içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımının gösterimi sırasıyla Şekil 6.9 ve 6.10'da verilmiştir. Yatay boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılmasının iki boyutlu ve yakından üç boyutlu görünüşü Şekil 6.11'deki gibidir. Sayısal analiz sonucunda referans düz boru için belirlenen sınır tabaka ayrılması ve test hücresi içerisindeki sıcaklık dağılımının uzaktan yaklaşarak incelenmesi işlemi, yivli boru için tekrar edilmiştir. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'de yiv geometrisinin boru yüzeyindeki sıcaklık değişimine etkisi 2 boyutlu sayısal sonuçlarda görülebilmektedir. Şekil 6.14'de ise 3 boyutlu model üzerinde sıcaklık değişimi sonuçları verilmiştir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da sırasıyla burgulu trapez yivli borunun sayısal çözümünde test hücresi içindeki uzaktan görünüşü ve test hücresinde yaklaşarak borunun test hücresi içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



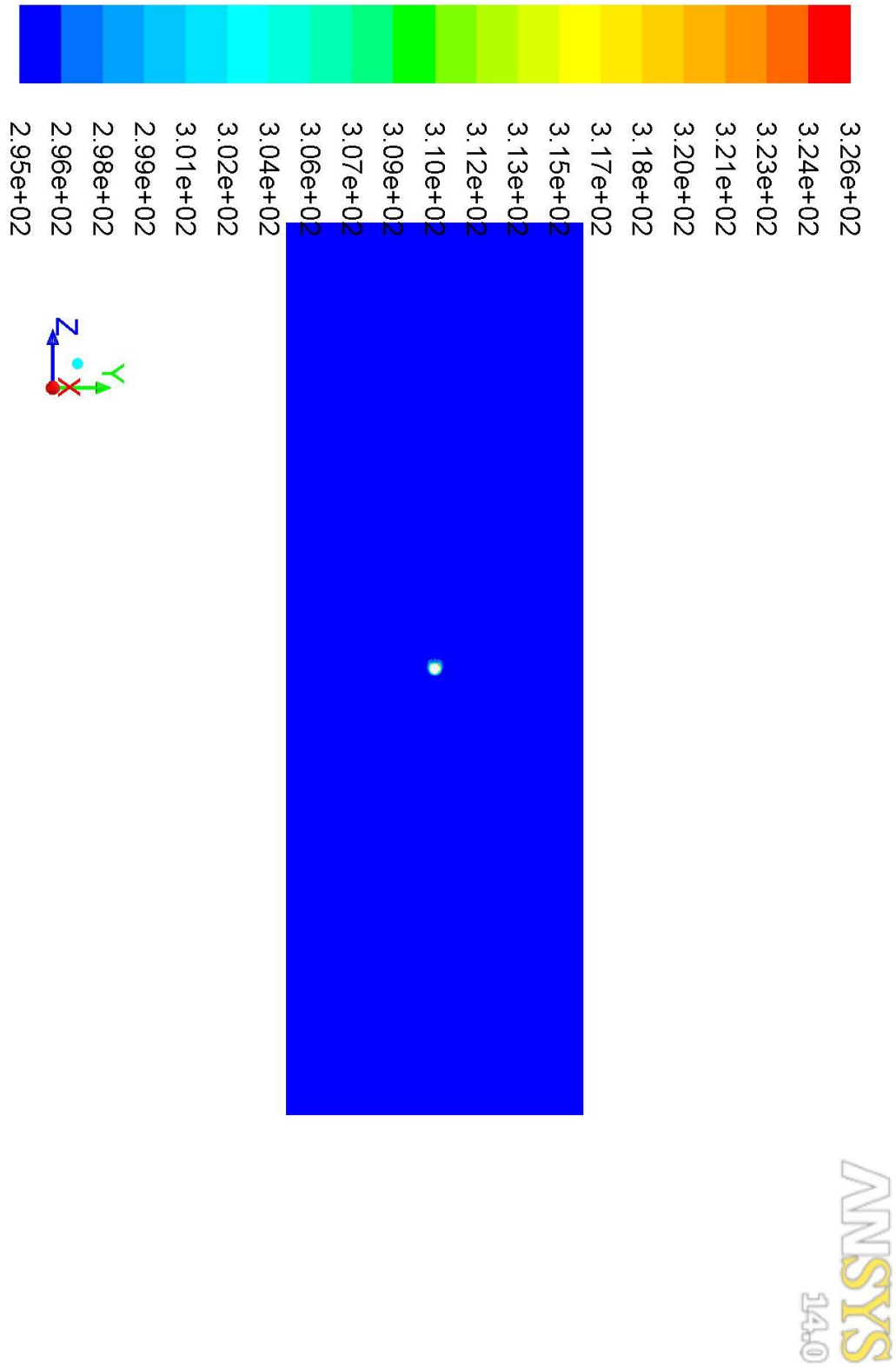
Şekil 6. 8 x-z koordinatlarında referans düz boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Çizelge 6. 2 Referans düz boru ve yivli boru için sayısal sonuçlar

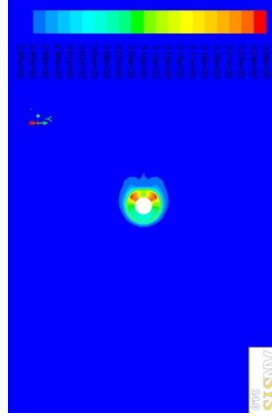
Referans düz boru						
Deney 1 $Q_h = 418.56 \text{ W/m}^2$	$h_{\text{deneysel}} (\text{W/m}^2\text{K})$	23.04	$h_{\text{sayısal}} (\text{W/m}^2\text{K})$	25.97	Fark	%11.29
	$T_{\text{deneysel}} (^{\circ}\text{C})$	40.20	$T_{\text{sayısal}} (^{\circ}\text{C})$	39.42	Fark	%1.97
	$Nu_{\text{deneysel}} (-)$	15.91	$Nu_{\text{sayısal}} (-)$	17.93	Fark	%11.29
Deney 2 $Q_h = 418.56 \text{ W/m}^2$	$h_{\text{deneysel}} (\text{W/m}^2\text{K})$	23.01	$h_{\text{sayısal}} (\text{W/m}^2\text{K})$	26.12	Fark	%11.91
	$T_{\text{deneysel}} (^{\circ}\text{C})$	40.10	$T_{\text{sayısal}} (^{\circ}\text{C})$	39.58	Fark	%1.31
	$Nu_{\text{deneysel}} (-)$	15.87	$Nu_{\text{sayısal}} (-)$	18.01	Fark	%11.91
Burgulu trapez yivli boru						
Deney 3 $Q_h = 498.62 \text{ W/m}^2$	$h_{\text{deneysel}} (\text{W/m}^2\text{K})$	31.07	$h_{\text{sayısal}} (\text{W/m}^2\text{K})$	34.74	Fark	% 10.51
	$T_{\text{deneysel}} (^{\circ}\text{C})$	40.30	$T_{\text{sayısal}} (^{\circ}\text{C})$	42.85	Fark	% 5.95
	$Nu_{\text{deneysel}} (-)$	21.44	$Nu_{\text{sayısal}} (-)$	23.97	Fark	% 10.51
Deney 4 $Q_h = 497.59 \text{ W/m}^2$	$h_{\text{deneysel}} (\text{W/m}^2\text{K})$	30.01	$h_{\text{sayısal}} (\text{W/m}^2\text{K})$	34.16	Fark	% 12.14
	$T_{\text{deneysel}} (^{\circ}\text{C})$	39.90	$T_{\text{sayısal}} (^{\circ}\text{C})$	43.16	Fark	% 7.55
	$Nu_{\text{deneysel}} (-)$	20.70	$Nu_{\text{sayısal}} (-)$	23.56	Fark	% 12.14

Çizelge 6. 3 Referans düz boru ve yivli borunun karşılaştırması için sayısal sonuçlar

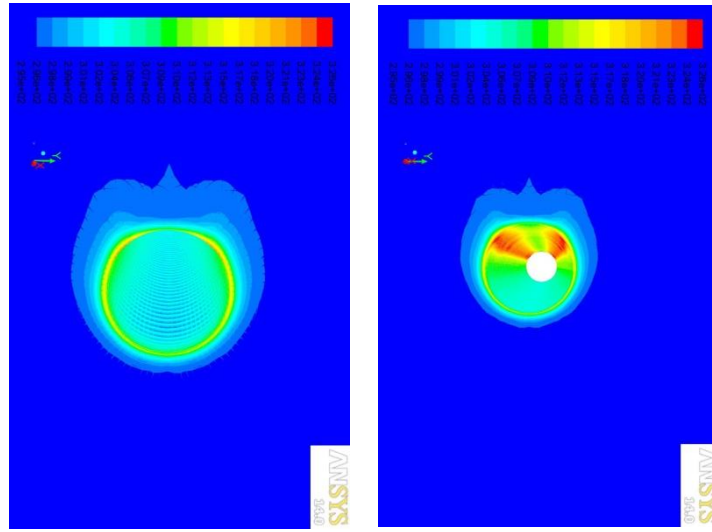
	$h_{\text{sayısal}}$ ($\text{W/m}^2\text{K}$)	$T_{\text{sayısal}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
Referans Düz Boru	25.97	39.42
Yivli Boru	21.06	51.18



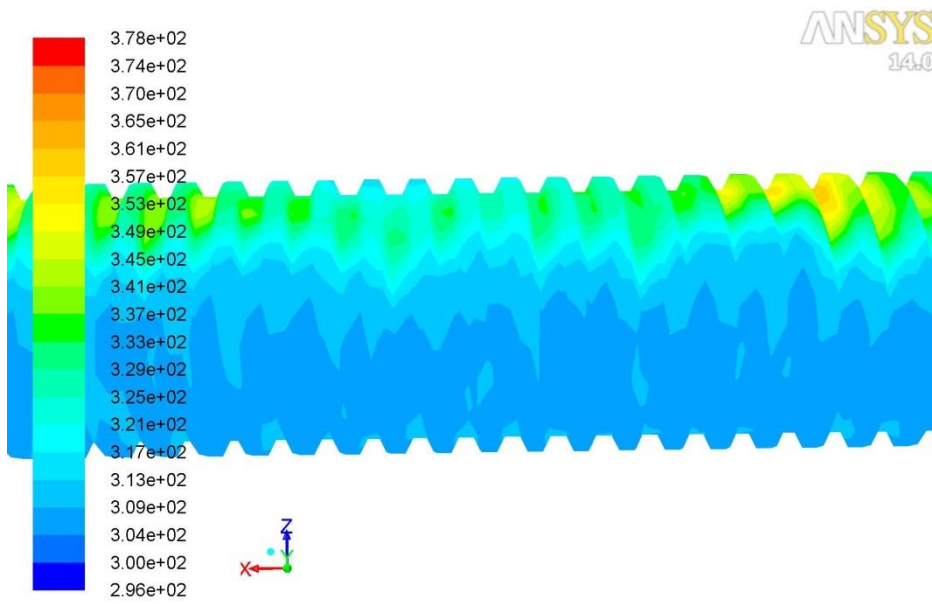
Şekil 6. 9 Referans düz borunun sayısal çözümünde test hücresi içinde uzaktan görünüşü



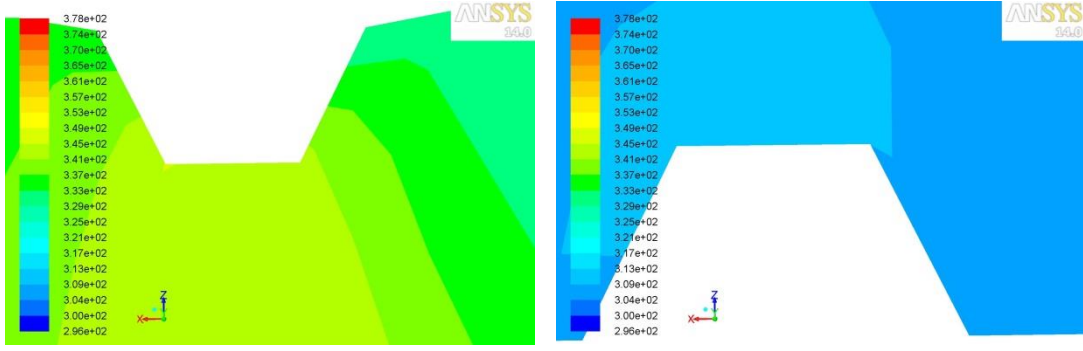
Şekil 6. 10 Referans düz borunun test hücresi içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı



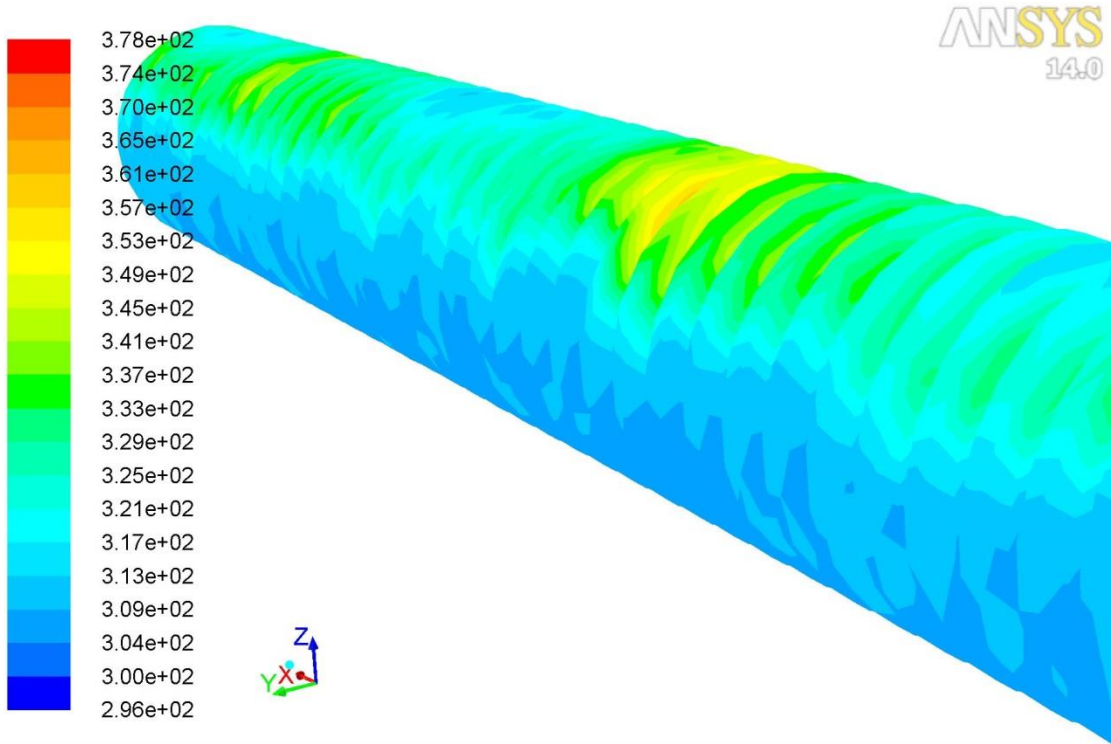
Şekil 6. 11 Yatay boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılmasının uzaktan iki boyutlu ve yakından üç boyutlu görünüşü



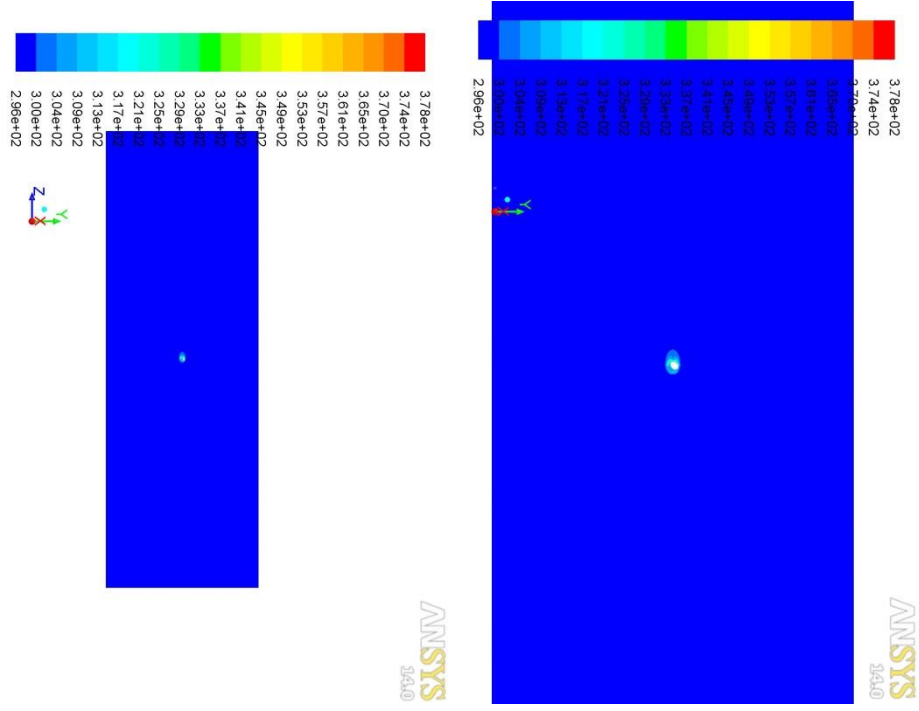
Şekil 6. 12 x-z koordinatlarında yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı



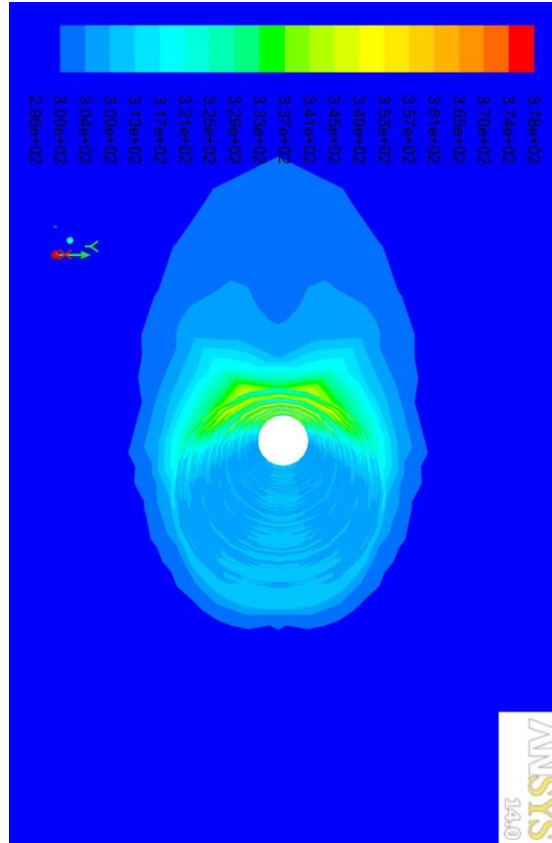
Şekil 6. 13 a) Üst yüzeydeki yiv çevresindeki sıcaklık dağılımı b) Alt yüzeydeki yiv çevresindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 6. 14 Üç boyutlu yivli boru modelinin yüzeyindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 6. 15 Test hücresindeki yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımının uzaktan ve yakından görünüşü



Şekil 6. 16 Test hücresindeki yivli boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılması

BELİRSİZLİK ANALİZİ

Deneylerde kullanılan ölçü aletlerinden alınan veriler ile hesaplanan değerlerin hata oranını belirlemek için birçok metot uygulanabilmektedir. Kline and McClintock [83] tarafından geliştirilen belirsizlik analizi methodu ile deneysel bulguların hata analizini yapmak mümkündür.

Literatürde belirtilen standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerde, hata iki farklı şekilde ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney setinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar, diğeri ise, deneyi yapan kişiden kaynaklanan hatalardır. Bahsedilen ikinci tür hataların, yetenekli bir deneycinin deneyleri yapması ile giderilmesi mümkündür. Fakat birinci tür hataların giderilmesi ve belirlenmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni, hataların doğrudan deneyde kullanılan araç ve gereçlerin yapısından kaynaklanmasıdır. Bu hatalı genliklerin genellikle belli olmaması nedeniyle literatürde hata olarak adlandırılmaktadır [84], [85].

Yukarıda genel olarak birinci tür hatalar diye ifade edilen, deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hata tiplerinin üç ana grupta toplamak mümkündür [86]. Birinci olarak; deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sebebi genellikle kesin olarak bilinmeyen, aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar, üçüncü olarak; deney ve gereçlerinde rastgele elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden vs. kaynaklanan rastgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rastgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur [85]. Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır ve uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabilir. Ölçü aletinin imalatının da doğru

yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rastgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır [83], [85].

7.1 Belirsizlik Analizi Yöntemi

Deney düzeneğinde bir takım ölçümler yapılarak tespit edilmesi yada hesaplanması gereken büyüklük C ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise $x_1, x_2, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda;

$$C = C(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (7.1)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve C büyüklüğünün hata oranı w_c ise, belirsizlik analizi yöntemine göre;

$$w_c = \pm \left[\left(\frac{\partial C}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial C}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bağıntı incelendiğinde, deneyde en büyük hataya neden olan değişkenin kolaylıkla tespit edilebildiği anlaşılmaktadır. Bu özellik belirsizlik analizi yönteminin en önemli üstünlüğü olarak belirtilebilir.

7.2 Belirsizliklerin Tespiti

Burada yapılan deneysel çalışmada öncelikle zorlanmış taşınım şartlarında yivli boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyler yapılmış, daha sonra referans düz boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyler yapılmıştır. Ayrıca düşen su filminin ısı transfer katsayısı içinde belirsizlik analizi yapılmıştır. İki grup deneyde hataya neden olan bağımsız değişkenler farklı olduğundan belirsizlik analizi çalışmaları da iki kısımda incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, öncelikle genel olarak hataya neden olan bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Eş zamanlı ısı ve kütle transferi gerçekleştiğinden, bağıl nem değerleri ϕ , boru yüzeyi sıcaklıkları ($T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}$), ısıtıcı gücü Q bağımsız değişkenleri incelenerek, hava-su arayüzündeki ısı taşınım katsayısı h_c , kütle taşınım katsayıları h_m , düşen su film akışının ısı taşınım katsayısı h_{ff} için deneysel ölçümlerden kaynaklanan belirsizlikler bulunmuştur. Taşınım katsayısının belirsizliğini bulmak için h_c ifade edilecek olursa,

$$h_c = \frac{Q_c}{A_c(T_y - T_\infty)} \quad (7.3)$$

Belirsizlik değeri ise,

$$w_{h_c} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_c}{\partial Q_c} w_{Q_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_c}{\partial T_y} w_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_c}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

şeklinde ifade edilir. Deney şartlarını etkileyen hataların belirlenmesine devam edilecek olursa,

$$Q_t = Q_c + Q_b \quad (7.5)$$

$$w_{Q_c} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_c}{\partial Q_t} w_{Q_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_c}{\partial Q_b} w_{Q_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.6)$$

$$w_{Q_c} = \pm \left[(w_{Q_t})^2 + (-w_{Q_b})^2 \right]^{1/2} \quad (7.7)$$

$$Q_b = \dot{m}_v h_{fg} \quad (7.8)$$

Buharlaşan su debisi,

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a (\omega_i - \omega_o) \quad (7.9)$$

$$Q_b = \dot{m}_a (\omega_i - \omega_o) h_{fg} \quad (7.10)$$

Havanın kütledebisi, test hücresinin giriş ve çıkışındaki mutlak nem değerlerine bağlı olarak belirsizlik,

$$w_{Q_b} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_b}{\partial \dot{m}_a} w_{\dot{m}_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_b}{\partial \omega_i} w_{\omega_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_b}{\partial \omega_o} w_{\omega_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.11)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\dot{m}_a = V A_{th} \rho_a \quad (7.12)$$

Uzunluğa bağlı olarak yapılan ölçüm hataları ihmal edildiğinde, anemometreye bağlı olarak hata,

$$w_{\dot{m}_a} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{m}_a}{\partial V} w_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.13)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

$$w_{\dot{m}_a} = \pm [(A_{th} \rho_a w_V)^2]^{1/2} \quad (7.14)$$

Mutlak nem, bağıl nemin ve sıcaklığın ölçülmesi ile belirlendiğinden;

$$\omega = 0.622 \frac{\varphi P_d}{P - \varphi P_d} \quad (7.15)$$

Test hücresi girişinde,

$$w_{\omega_i} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial \varphi} w_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial P_d} w_{P_d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.16)$$

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial \varphi} = \frac{0.622 P_d P_{atm}}{(P_{atm} - \varphi P_d)^2} \quad (7.17)$$

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial P_d} = \frac{0.622 \varphi P_{atm}}{(P_{atm} - \varphi P_d)^2} \quad (7.18)$$

$$P_d = 10^{\left[\frac{7.5 T_i}{237.5 + T_i} + 2.7859 \right]} \quad (7.19)$$

Doyma basıncı, T_i sıcaklığında Tetens bağıntısı kullanılarak belirlenmektedir. Hata oranı ise,

$$w_{P_d} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_i} w_{T_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.20)$$

$$\frac{\partial P_d}{\partial T_i} = \left(7.5 \left(\frac{1}{237.5 + T_i} + \frac{T_i}{(237.5 + T_i)^2} \right) \right) 10^{\left[\frac{7.5 T_i}{237.5 + T_i} + 2.7859 \right]} \ln 10 \quad (7.21)$$

Test hücresi çıkışında,

$$w_{\omega_o} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_o}{\partial \varphi} w_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_o}{\partial P_d} w_{P_d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.22)$$

$$P_d = 10^{\left[\frac{7.5 T_o}{237.5 + T_o} + 2.7859 \right]} \quad (7.23)$$

$$w_{P_d} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_o} w_{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.24)$$

$$\frac{\partial P_d}{\partial T_o} = \left(7.5 \left(\frac{1}{237.5 + T_o} + \frac{T_o}{(237.5 + T_o)^2} \right) \right) 10^{\left[\frac{7.5 T_o}{237.5 + T_o} + 2.7859 \right]} \ln 10 \quad (7.25)$$

Enerji dengesi yazılacak ve hata analizi yapılacak olursa,

$$Q_t = Q_h + \dot{m}_i h_i - \left(\dot{m}_i - (\dot{m}_a (\omega_i - \omega_o)) \right) h_o \quad (7.26)$$

$$w_{Q_t} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_t}{\partial Q_h} w_{Q_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial m_i} w_{m_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial m_a} w_{m_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial h_i} w_{h_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial h_a} w_{h_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial \omega_i} w_{\omega_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial \omega_o} w_{\omega_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.27)$$

Isıtıcının, anemometrenin, su debimetresinin, termoelemanların ve higrometrelerin doğruluk değerinin sisteme etkisi tanımlanmıştır. Suyun entalpi değerlerinin hata değeri, özgül ısıma ısısının sıcaklıkla değişiminin ihmal edilmesi durumunda,

$$h = c_p T \quad (7.28)$$

Anemometre cihazından alınan sıcaklık değerlerinden kaynaklanan hata değerleri,

$$w_{h_i} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial T_i} w_{T_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.29)$$

$$w_{h_o} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_o}{\partial T_o} w_{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.30)$$

Verilen Q_b denklemi çözümlenecek olursa,

$$w_{Q_b} = \pm \left[\left(((\omega_i - \omega_o) h_{fg}) w_{m_a} \right)^2 + (m_a h_{fg} w_{\omega_i})^2 + (-m_a h_{fg} w_{\omega_o})^2 \right]^{1/2} \quad (7.31)$$

Boru yüzeyinde bulunan termoelemanların belirsizliği,

$$T_y = \frac{\sum_1^n T_n}{n} \quad (7.32)$$

$$w_{T_y} = \pm \left[\left(\frac{\partial T_y}{\partial T_1} w_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_y}{\partial T_2} w_{T_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial T_y}{\partial T_9} w_{T_9} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.33)$$

$n=9$ olduğuna göre,

$$w_{T_y} = \pm \left[\left(\frac{1}{9} w_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{9} w_{T_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{9} w_{T_9} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.34)$$

olarak ifade edilmiştir. Böylece taşınım katsayısının (h_c) belirsizliği 7.35 eşitliği ile bulunmuştur.

$$w_{h_c} = \pm \left[\left(\frac{1}{A_c(T_y - T_\infty)} w_{Q_c} \right)^2 + \left(\frac{-Q_c}{A_c(T_y - T_\infty)^2} w_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{Q_c}{A_c(T_y - T_\infty)^2} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.35)$$

Ayrıca Nu , Sh , gibi belirlenen boyutsuz parametrelerinde belirsizlik analizi yapılmıştır. Nu değerinin hata oranı,

$$Nu = \frac{h_c L_{kar}}{k_a} \quad (7.36)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial h_c} w_{h_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.37)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{L_{kar}}{k_a} w_{h_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.38)$$

şeklindedir. Sh değerinin hata oranı ise,

$$Sh = \frac{h_m L_{kar}}{D_{AB}} \quad (7.39)$$

$$w_{Sh} = \pm \left[\left(\frac{\partial Sh}{\partial D_{AB}} w_{D_{AB}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Sh}{\partial h_m} w_{h_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.40)$$

$$w_{Sh} = \pm \left[\left(\frac{-h_m L_{kar}}{D_{AB}^2} w_{D_{AB}} \right)^2 + \left(\frac{L_{kar}}{D_{AB}} w_{h_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.41)$$

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} \quad (7.42)$$

$$w_{D_{AB}} = \pm \left[\left(\frac{\partial D_{AB}}{\partial T} w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.43)$$

şeklinde belirlenmiştir.

Taşıyım ile kütle geçiş katsayısı h_m (m/s) değerinin hata analizi için buharlaşan suyun debisi tanımlanacak olursa,

$$\dot{m}_v = h_m \rho_{v,o} A_c (\omega_{a,y} - \omega_{a,\infty}) \quad (7.44)$$

$$w_{h_m} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_m}{\partial \omega_{a,y}} w_{\omega_{a,y}} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial \omega_{a,\infty}} w_{\omega_{a,\infty}} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial \dot{m}_v} w_{\dot{m}_v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.45)$$

$$w_{h_m} = \pm \left[\left(\frac{\dot{m}_v}{\rho_{v,f} A_c} \frac{-1}{(\omega_{a,y} - \omega_{a,\infty})^2} w_{\omega_{a,y}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_v}{\rho_{v,f} A_c} \frac{1}{(\omega_{a,y} - \omega_{a,\infty})^2} w_{\omega_{a,\infty}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\rho_{v,f} A_c (\omega_{a,y} - \omega_{a,\infty})} w_{\dot{m}_v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.46)$$

$\omega_{a,s}$ doymuş havanın mutlak neminin bulunmasında higrometre ve sıcaklık ölçerden kaynaklanan belirsizlik,

$$\omega_{a,y} = 0.622 \frac{P_d}{P_{atm} - P_d} \quad (7.47)$$

$$w_{\omega_{a,y}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_{a,y}}{\partial P_d} w_{P_d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.48)$$

$$P_d = 10^{\left[\frac{7.5T_y}{237.5+T_y} + 2.7859 \right]} \quad (7.49)$$

$$w_{P_d} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_s} w_{T_s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.50)$$

$$\frac{\partial P_d}{\partial T_y} = \left(7.5 \left(\frac{1}{237.5+T_y} + \frac{T_y}{(237.5+T_y)^2} \right) \right) 10^{\left[\frac{7.5T_y}{237.5+T_y} + 2.7859 \right]} \ln 10 \quad (7.51)$$

Ortamin mutlak neminin bulunmasında higrometre ve sıcaklık ölçerden kaynaklanan belirsizlik,

$$\omega_{a,\infty} = 0.622 \frac{\varphi P_d}{P_{atm} - \varphi P_d} \quad (7.52)$$

$$w_{\omega_{a,\infty}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial \varphi} w_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_{a,\infty}}{\partial P_d} w_{P_d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.53)$$

$$P_d = 10^{\left[\frac{7.5T_{\infty}}{237.5+T_{\infty}} + 2.7859 \right]} \quad (7.54)$$

$$w_{P_d} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_{\infty}} w_{T_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.55)$$

$$\frac{\partial P_d}{\partial T_{\infty}} = \left(7.5 \left(\frac{1}{237.5+T_{\infty}} + \frac{T_y}{(237.5+T_{\infty})^2} \right) \right) 10^{\left[\frac{7.5T_{\infty}}{237.5+T_{\infty}} + 2.7859 \right]} \ln 10 \quad (7.56)$$

Buharlaşan su debisinin belirsizliği,

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a (\omega_i - \omega_o) \quad (7.57)$$

$$w_{m_v} = \pm \left[\left(\frac{\partial m_v}{\partial m_a} w_{m_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial \omega_i} w_{\omega_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial \omega_o} w_{\omega_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.58)$$

şeklinde belirlenmektedir. h_c belirlenmesinde ifade edilen denklemler yardımıyla,

$$\dot{m}_a = V A_{th} \rho_a \quad (7.59)$$

$$w_{m_a} = \pm \left[\left(\frac{\partial m_a}{\partial V} w_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.60)$$

$$w_{m_a} = \pm [(A_{th} \rho_a w_V)^2]^{1/2} \quad (7.61)$$

$$\omega = 0.622 \frac{\varphi P_d}{P_{atm} - \varphi P_d} \quad (7.62)$$

$$w_{\omega_i} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial \varphi} w_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial P_{d_i}} w_{P_{d_i}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.63)$$

$$w_{P_{d_i}} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_i} w_{T_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.64)$$

$$w_{\omega_o} = \pm \left[\left(\frac{\partial \omega_o}{\partial \varphi} w_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_o}{\partial P_{d_o}} w_{P_{d_o}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.65)$$

$$w_{P_{d_o}} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_d}{\partial T_o} w_{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.66)$$

şeklinde belirlenmiştir.

Düşen su filminin taşınım katsayısının belirlenmesinde ise debimetre, termo elemanlar, anemometre ve sıcaklık ölçerin belirsizlikleri hesaba katılarak, 7.67 ve 7.68 eşitlikleri ile belirlenmiştir.

$$h_{ff} = \frac{Q_t}{A_c(T_{bes}-T_y)} \quad (7.67)$$

$$w_{h_{ff}} = \pm \left[\left(\frac{1}{A_c(T_{bes}-T_y)} w_{Q_t} \right)^2 + \left(\frac{-Q_t}{A_c(T_{bes}-T_y)^2} w_{T_{bes}} \right)^2 + \left(\frac{Q_t}{A_c(T_{bes}-T_y)^2} w_{T_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.68)$$

Deney sonuçlarına göre yukarıda ifade edilen denklemler kullanılarak, bulunan belirsizlik oranları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7. 1 Yivli boru ve referans düz boru deneylerinin belirsizlik değerleri

Yivli Boru Deneyleri		Referans Düz Boru Deneyleri	
h_c (W/m ² K)	±% 1.715	h_c (W/m ² K)	±% 1.311
Nu (-)	±% 1.715	Nu (-)	±% 1.311
h_m (m/s)	±% 9.818	h_m (m/s)	±% 9.883
Sh (-)	±% 9.818	Sh (-)	±% 9.883
m_{buh} (kg/s)	±% 0.0705	m_{buh} (kg/s)	±% 0.0755
h_{ff} (W/m ² K)	±% 4.048	h_{ff} (W/m ² K)	±% 4.344

SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında öncelikle MATLAB programı görüntü işleme araç çubuğu kullanılarak, farklı yiv geometrili borular için görüntü işleme analizi yapılmıştır. Farklı yiv geometrili borular için ıslaklık alan sonuçları Şekil 4.39'da verilmiştir. Şekil 4.39'a göre en fazla ıslaklık alanının burgulu trapez yiv geometrili boruda olduğu görülmüştür. Düşen su filminin Reynolds sayıları belirlenmiş ve akış tipi haritası çıkarılmıştır. Isı taşınım katsayısı ile taşınım kütle geçiş katsayısının, düşen su filmi akışında Colburn eşitliğine göre doğruluğu belirlenmiştir. Literatürdeki h , Nu sonuçları ile deneysel bulgular karşılaştırılmıştır. Yivli boru için Nu ve Sh değerlerinin belirlenebilmesi için korelasyon önerilmiştir. Eş zamanlı ısı ve kütle transferi, en fazla ıslaklık alanını veren trapez burgulu yivli boru ile referans düz yatay boru üzerinde incelenmiştir ve sonuçlar aşağıda maddelenmiştir.

- Yivli boru ve referans düz boru için düşen film tipi akışı olmadan zorlanmış taşınım koşullarında yapılan deneylerin sonuçları, dünya çapında kabul gören bilimsel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Hilpert [69] ile $\pm 5\%$, Zhukauskas [70] ile $\pm 6\%$ hata oranı ile ısı taşınım katsayısı ve Nu değerlerinin uyum sağladığı görülmüştür.
- Deneyler, 30-220 lt/h besleme suyu debisi aralığında yapılmıştır. Besleme suyu debisinde ki artış ile buharlaşan su miktarı artmaktadır. Deneylerde boru yüzey sıcaklığı 30 °C, 35 °C ve 40 °C olacak şekilde çalışılmıştır. Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'den boru yüzey sıcaklığı arttıkça buharlaşan su miktarında arttığı

anlaşılmaktadır. Boru yüzey sıcaklığının artmasıyla, su filmi yüzeyindeki su buharı kısmi basıncı arttığından buharlaşan su miktarı artmaktadır.

- Deneyler 1.5, 2.2 ve 3.0 m/s hava hızlarında yapılmıştır. Buharlaşan su miktarının besleme suyu debisine oranı, buharlaşma oranı olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'den besleme suyu debisi arttıkça azaldığı, besleme suyu sıcaklığı arttıkça ise arttığı belirlenmiştir.
- Düşen su filminin sıcaklığının artmasıyla, $h_m/(P_d-P_s)$ azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum su film sıcaklığının artması ile su buharı doyma basıncının artışından kaynaklanmaktadır.
- Hava hızının buharlaşan su miktarına etkisi incelenmiştir. Deneysel bulgulara göre havanın Reynolds sayısının artması ile buharlaşan su miktarında arttığı görülmüştür. Taşınım ile kütle geçiş katsayısının artması sonucunda buharlaşan su miktarında artmaktadır.
- Burgulu trapez geometrili yivli boruda taşınım ile kütle geçiş katsayısının referans düz boru ile karşılaştırıldığında, yaklaşık aynı olduğu belirlenmiştir.
- Yivli boru için üç farklı hava hızında ayrı ayrı Nusselt ifadesi $Nu=f(Re_a, Pr, Re_s, T_{bes})$ şeklindeki korelasyonlar ile belirlenebilmektedir ve korelasyonların doğruluğu $\pm\%25$ olarak saptanmıştır.
- Yivli boru için genel Nusselt ifadesi olarak, havanın ve düşen su filminin Reynolds değerleri için $Nu_g = a (Pr)^{1/3} (Re_a)^b (Re_s)^c$ korelasyonu önerilmiştir. Burada a sabiti 1.9778, b sabiti 0.15646 ve c sabiti 0.73441'dir. Korelasyonun sayısal değerleri ile deneysel bulgular karşılaştırılmıştır ve $\pm\%25$ doğrulukta olduğu gözlemlenmiştir.
- Yivli boru için ısı-kütle benzeşimi kullanılarak, Nu korelasyonunda Pr yerine Sc, Nu yerine Sh kullanılarak, Sherwood sayısı belirlenebilmektedir. Deneysel bulgular kullanılarak elde edilen boyutsuz parametreler incelenecek olursa, Sh sayısının artan hava hızı ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Boru üzerinden düşen su filminin yüzeyi ile hava arayüzündeki ısı ve kütle transferinin incelenmesi sonucunda yivli boru için genel Sherwood ifadesi olarak, havanın ve düşen su

filminin Reynolds değerleri için $Sh_g = a (Sc)^{1/3} (Re_a)^b (Re_s)^c$ korelasyonu önerilmiştir. Burada a sabiti 1.9778, b sabiti 0.15646 ve c sabiti 0.73441'dir.

- Deneylerden ısı transfer katsayılarının ve taşınım kütlesi geçiş katsayılarının besleme suyu debisinin artması ile artış gösterdiği görülmektedir. Literatürde, Merkel metodu kullanılarak yapılan çalışmalarda, Lewis sayısı $Le = 1$ olarak alınmış, buharlaşma sebebi ile su debisinin değişimi ihmal edilmiştir. Yapılan çalışmada hem buharlaşan su debisinin değişimi hemde Le katsayısının değişimi gözönüne alınarak hesap yapılmıştır. Colburn eşitliğine göre hesaplanan ısı transfer katsayılarının ve taşınım kütlesi geçiş katsayılarının, deney bulgularıyla uyumlu olduğu Şekil 5.23'de görülmektedir.
- Isıtılmış yatay yivli boru üzerinden düşen su filminin Reynolds sayısına bağlı olarak düşen su filminin Nu değerlerinin değişimi Şekil 5.31'de verilmiştir. Sabit ısı akısında, yivli boruda besleme suyu giriş sıcaklığı ile boru yüzey sıcaklığının farkının daha fazla olması sebebiyle referans düz boruya göre daha düşük ısı taşınım katsayılarına sahiptir.
- Referans düz boru ve yivli boru için Ansys FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiği programında yapılan sayısal çözümleme sonucunda, deneysel verilerin %2 ile %12 aralığında yakınsadığı belirlenmiştir.
- Şekil 5.24'de Galileo sayısına bağlı olarak deneylerin akış haritası çıkarılmıştır ve damlacıklı, damlacıklı-jet ve jet akış bölgelerinde taşınım ısı ve kütlesi geçiş katsayılarının belirlendiği gösterilmiştir.

8.2 Öneriler

Tek boru üzerinde düşen film tipi akışta gerçekleşen ısı ve kütlesi transferinin, deneysel sonuçları ve teorik analiz bu çalışmada verilmiştir. Yivli borulardan oluşturulan ısı değiştiricilerin, soğutma kuleleri, evaporatif soğutucularda, soğurmalı soğutma sistemlerinde, deniz suyunu tuzdan arındırma sistemlerinde kullanılması önerilmektedir. Isı ve kütlesi transferinin arttığı sistemlerde, daha az yüzey alanına ihtiyaç duyulacağından kompakt cihazlar tasarlanabilecektir. Farklı hava hızlarında, su debilerinde ve su sıcaklıklarında yapılan deneysel çalışmalar, düşen film tipi akışlı

sistemlerin tasarımında yol gösterici olacaktır. İstenilen şartlarda verilen genel Nu bağıntısı kullanılarak, sistem tasarımları yapılabilecektir. Yiv geometrisi ile mevcut sistemler daha düşük su debilerinde çalışılabilecektir ve ısı transfer yüzeyi de arttırıldığından daha verimli cihazlar tasarlanabilecektir. Ayrıca düşen su filmi ile hava ara yüzeyinde gerçekleşen eşzamanlı ısı ve kütle transferi, sayısal olarak çözümlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Adams, F.W., Broughton, G. ve Conn, A.L., (1936). "A Horizontal Film-type Cooler: Film Coefficients of Heat Transmissions", *Industrial and Engineering Chemistry*, 28: 537–541.
- [2] Maron–Moalem, D., Sideman, S. ve Dukler, A.E., (1978). "Dripping Characteristics in a Horizontal Tube Film Evaporator", *Desalination*, 27: 117–127.
- [3] Yung, D., Lorenz, J.J. ve Ganic, E.N., (1980). "Vapor/Liquid Interaction and Entrainment in Falling Film Evaporators", *Journal of Heat Transfer*, 102: 20–25.
- [4] Rogers, J.T., (1981). "Laminar Falling Film Flow and Heat Transfer Characteristics on Horizontal Tubes", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 59: 213–222.
- [5] Liu, Z.H., Zhu, Q.Z. ve Chen, Y.M., (2002). "Evaporation Heat Transfer of Falling Water Film on a Horizontal Tube Bundle", *Heat Transfer-Asian Research*, 31: 42–55.
- [6] Louahlia Gualous, H., El Omari, L., Panday, P. K. ve Artioukhine, E., (2005). "Experimental Analysis of the Local Heat Transfer Coefficient of Falling Film Evaporation with and without Co-current Air Flow Velocity", *Heat Mass Transfer*, 41: 1066–1076.
- [7] Armbruster, R. ve Mitrovic, J., (1998). "Evaporative Cooling of a Falling Water Film on Horizontal Tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18: 183–194.
- [8] Hu, X. ve Jacobi, A.M., (1998). "Departure-site Spacing for Liquid Droplets and Jets Falling between Horizontal Circular Tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16: 322–331.
- [9] Hu, X. ve Jacobi, A.M., (1996). "The Intertube Falling Film: Part 1--Flow Characteristics, Mode Transitions, and Hysteresis", *Journal of Heat Transfer*, 118(3): 616–625.
- [10] Hasan, A. ve Siren, K., (2003). "Performance Investigation of Plain and Finned Tube Evaporatively Cooled Heat Exchangers", *Applied Thermal Engineering*, 23: 325–340.

- [11] Chyu, M.C., Zheng, J. ve Ayub, Z., (2009). "Bundle Effect of Ammonia/Lubricant Mixture Boiling on a Horizontal Bundle with Enhanced Tubing and Inlet Quality", *International Journal of Refrigeration*, 32: 1876–1885.
- [12] Kim, H.Y. ve Kang, B.H., (2003). "Effects of Hydrophilic Surface Treatment on Evaporation Heat Transfer at the Outside Wall of Horizontal Tubes", *Applied Thermal Engineering*, 23: 449–458.
- [13] Mohamed, A.M.I., (2007). "Flow Behavior of Liquid Falling Film on a Horizontal Rotating Tube", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31: 325–332.
- [14] Mitrovic, J., (1986). "Influence of Tube Spacing and Flow Rate on Heat Transfer from a Horizontal Tube to a Falling Liquid Film", *Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, 17-22 Ağustos 1986, San Francisco, 1949–1956.
- [15] Ribastski, G. ve Jacobi, A.M., (2005). "Falling-film Evaporation on Horizontal Tubes – a Critical Review", *International Journal of Refrigeration*, 28: 635–653.
- [16] Rogers, J.T. ve Goindi, S.S., (1989). "Experimental Laminar Falling Film Heat Transfer Coefficient on a Large Diameter Horizontal Tube", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67: 560–568.
- [17] Kocamustafaoğulları, G. ve Chen, I.Y., (1988). "Falling Film Heat Transfer Analysis on a Bank of Horizontal Tube Evaporator", *AIChE Journal*, 34: 1539–1549.
- [18] Lienhard, J.H. ve Wong, P.T.Y., (1964). "The Dominant Usable Wavelength and Minimum Heat Flux During Film Boiling on a Horizontal Cylinder", *Journal of Heat Transfer*, 86: 220-226.
- [19] Hu, X. ve Jacobi, A.M., (1996). "The Intertube Falling Film: Part 2—Mode Effects on Sensible Heat Transfer to a Falling Liquid Film", *Journal of Heat Transfer*, 118: 626–633.
- [20] Yung, D., Lorentz, J.J. ve Ganic, E.N., (1980). "Vapor/Liquid Interaction and Entrainment in Falling Film Evaporators", *Journal of Heat Transfer*, 102: 20–25.
- [21] Taghavi-Tafreshi K. ve Dhir V.K., (1980). "Taylor Instability in Boiling, Melting and Condensation or Evaporation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23: 1433–1445.
- [22] Drögemüller, P., *Viskose Rieselfilme im Waagerechten Rohrbündel-Strömungsformen, Wärmeübergang und Mechanische Beeinflussung*, <http://d-nb.info/954640772>, 10 Şubat 2010.
- [23] Ruan, B., Jacobi, A.M. ve Li, L., (2009). "Effects of a Countercurrent Gas Flow on Falling-film Mode Transitions between Horizontal Tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33: 1216–1225.

- [24] Habert, M., (2009). Falling Film Evaporation on a Tube Bundle with Plain and Enhanced Tubes, Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Lozan.
- [25] Roques, J.F. ve Thome, J.R., (2003). "Falling Film Transitions between Droplets, Column and Sheet Flow Modes on a Vertical Array of Horizontal 19 fpi and 40 fpi Low Finned Tubes", Heat Transfer Engineering, 24: 40-45.
- [26] Liu, Z.H. ve Yi, J., (2002). "Falling Film Evaporation Heat Transfer of Water/Salt Mixtures from Roll-worked Enhanced Tubes and Tube Bundle", Applied Thermal Engineering, 22(1): 83-95.
- [27] Cosenza, F. ve Vliet, G.C., (1990). "Absorption in Flowing Water/LiBr Films on Horizontal Tubes", ASHRAE Transactions, 96: 693-701.
- [28] Choudhury, S.K., Hisajima, D., Ohuchi, T., Nishiguchi, A., Fukushima, T. ve Sakaguchi, S., (1993). "Absorption of Vapors into Liquid Films Flowing over Cooled Horizontal Tubes", ASHRAE Transactions, 99: 81-89.
- [29] Sernas, V., (1979). "Heat Transfer Correlation for Subcooled Water Films on Horizontal Tubes", Journal of Heat Transfer, 101: 176-178.
- [30] Parken, W.H., (1975). Heat Transfer to Thin Films on Horizontal Tubes, Doktora Tezi, Rutgers University, New Brunswick.
- [31] Furukawa, M., Kaneko, T., Sasaki, N. ve Nosetani, T., (1992). "Heat Transfer Performance of Various Tubes for Absorber of Absorption Chiller", Proceedings of the 29th National Heat Transfer Symposium of Japan, 29-31 Mayıs 1992, Osaka, 536-538.
- [32] Ganic, E.N. ve Roppo, M.N., (1980). "An Experimental Study of Falling Liquid Film Breakdown on a Horizontal Cylinder during Heat Transfer", Journal of Heat Transfer, 102: 342-346.
- [33] Chyu, M.C., Bergles, A.E. ve Mayinger, F., (1982). "Enhancement of Horizontal Tube Spray Film Evaporators", Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, 6-10 Eylül 1982, Munich, 275-280.
- [34] Parken, W.H. ve Fletcher, L.S., (1982). "Heat Transfer in Thin Liquid Films Flowing over Horizontal Tubes", Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, 6-10 Eylül 1982, Munich, 415-420.
- [35] Ming-Chein, C., (1984). Falling Film Evaporation on Horizontal Tubes with Smooth and Structured Surfaces, Doktora Tezi, Iowa State University, Iowa.
- [36] Chyu, M.C. ve Bergles, A.E., (1987). "An Analytical and Experimental Study of Falling-film Evaporation on a Horizontal Tube", Journal of Heat Transfer, 109: 983-990.
- [37] Chyu, M.C. ve Bergles, A.E., (1989). "Horizontal-tube Falling-film Evaporation with Structured Surfaces", Journal of Heat Transfer, 111: 518-524.
- [38] Ganic, E.N. ve Getachew, D., (1986). "Effects of Surface Condition and Working Fluid on Liquid Film Breakdown during Heat Transfer", Proceedings

of the 8th International Heat Transfer Conference, 17-22 Ağustos 1986, San Francisco, 1931–1936.

- [39] Parken, W.H., Fletcher, L.S., Sernas, V. ve Han J.C., (1990). “Heat Transfer through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes”, *Journal of Heat Transfer*, 112: 744–750.
- [40] Armbruster, R. ve Mitrovic, J., (1995). “Heat Transfer in Falling Film on a Horizontal Tube”, *Proceedings of the National Heat Transfer Conference*, 6-9 Ağustos 1995, Portland, 13–21.
- [41] Hu, X., (1995). *The Intertube Falling-film Modes: Transition, Hysteresis and Effect on Heat Transfer*, Doktora Tezi, University of Illinois, Chicago.
- [42] Putilin, J.V., Podberezny, V.L. ve Rifert, V.G., (1996). “Evaporation Heat Transfer in Liquid Films Flowing down Horizontal Smooth and Longitudinally Profiled Tubes”, *Desalination*, 105: 165–170.
- [43] Liu, Z.H. ve Yi, J., (2001). “Enhanced Evaporation Heat Transfer of Water and R-11 Falling Film with the Roll-worked Enhanced Tube Bundle”, *Experimental Thermal Fluid and Science*, 25: 447–455.
- [44] Rifert, V.G., Podberezny, V.I., Putilin, J.V., Nikitin, J.G. ve Barabash, P.A., (1989). “Heat Transfer in Thin Film-type Evaporator with Profiled Tubes”, *Desalination*, 74: 363–372.
- [45] Roques, J.F., Dupont, V. ve Thome, J.R., (2002). “Falling Film Transitions on Plain and Enhanced Tubes”, *Journal of Heat Transfer*, 124: 491–499.
- [46] Yoon, J., Kwon, O. ve Moon, C., (1999). “Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer in Absorber with Enhanced Tubes”, *KSME International Journal*, 13(9): 640–646.
- [47] Yoon, J.I., Kim, E., Choi, K.H. ve Seol, W.S., (2002). “Heat Transfer Enhancement with a Surfactant on Horizontal Bundle Tubes of an Absorber”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 735-741.
- [48] Helbig, K., Alexeev, A., Gambaryan-roisman, T. ve Stephan, P., (2005). “Evaporation of Falling and Shear-Driven Thin Films on Smooth and Grooved Surfaces”, *Flow Turbulence and Combustion*, 75: 85-104.
- [49] Sultana, P., Wjaysundura, N.E., Ho, J.C. ve Yap, C., (2007). “Modeling of Horizontal Tube-bundle Absorbers of Absorption Cooling Systems”, *International Journal of Refrigeration*, 30: 709-723.
- [50] Wang, M.X., Liu, C.F., Wang, X.G. ve Zhao, B., (2006). “Study on the Falling Film Absorption Outside Smooth and Enhanced Tubes”, *Journal of Hydrodynamics*, 18: 405-410.
- [51] Xie, G., Sheng, G., Pansal, P.K. ve Li, G., (2008). “Absorber Performance of a Water/Lithium–Bromide Absorption Chiller”, *Applied Thermal Engineering*, 28: 1557–1562.
- [52] Herrera, J.V., García-Valladares, O., Gomez, V.H. ve Best, R., (2010). “Numerical Simulation and Experimental Results of Horizontal Tube Falling

- Film Generator Working in a $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ Absorption Refrigeration System”, *Applied Thermal Engineering*, 30: 1751–1763.
- [53] Yang, L. ve Shen, S., (2008). “Experimental Study of Falling Film Evaporation Heat Transfer outside Horizontal Tubes”, *Desalination*, 220: 654-660.
 - [54] Bourounia, K., Chaibib, M.T. ve Tadrist, L., (2001). “Analytical Analysis of Heat Transfer in Liquid Film Dripping around a Horizontal Tube”, *Desalination*, 141: 7-13.
 - [55] Yoon, J.I., Phan, T.T., Moon, C.G., Lee, H.S. ve Jeong, S.K., (2008). “Heat and Mass Transfer Characteristics of a Horizontal Tube Falling Film Absorber with Small Diameter Tubes”, *Heat Mass Transfer*, 44: 437–444.
 - [56] Hoffmann, L., Greiter, I., Wagner, A., Weiss, V. ve Alefeld, G., (1996). “Experimental Investigation of Heat Transfer in a Horizontal Tube Falling Film Absorber with Aqueous Solutions of LiBr with and without Surfactants”, *International Journal of Refrigeration*, 19: 331–341.
 - [57] Kyung, I.S. ve Herold, K.E., (2002). “Performance of Horizontal Smooth Tube Absorber with and without 2-ethyl-hexanol”, *Journal of Heat Transfer*, 124: 177–183.
 - [58] Furukawa, M., Sasaki, N., Kaneko, T. ve Nosetani, T., (2011). “Enhanced Heat Transfer Tubes for Absorber of Absorption Chiller/Heater”, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 10: 219–226.
 - [59] Nagaoka, Y., Nishiyama, N., Ajisaka, K. ve Nakamura, M., (1987). “Research and Development of Absorption Chiller/Heater of High Performance: High Performance Absorber and Evaporator”, *Tokyo Gas Tech Rep*, 31: 113–128.
 - [60] Kawamata, O., Otani, T., Oshitulia, N. ve Aliyanchi, T., (1989). “Development of High Performance Heat Transfer Tubes for Absorber of Absorption Refrigerator”, *Hitachi*, 8: 57–62.
 - [61] Yamaguchi, S., Nishimura, N., Nomura, T., (1993). “Performance Analysis of Absorption and Heat Exchange for Absorption Refrigerator Absorber”, *Proceedings of 1993 JSRAE Annual Conference*, 4-6 Mayıs 1993, Japan, 129–132.
 - [62] Rogers, J.T., Goindi, S.S. ve Lamari, M., (1995). “Turbulent Falling Film Flow and Heat Transfer on Horizontal Tube”, *Proceedings of the National Heat Transfer Conference*, 6-9 Ağustos 1995, Portland, 3–12.
 - [63] Parker, R.O. ve Treybal R.F., (1961). *The Heat Mass Transfer Characteristics of Evaporative Coolers*, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 57, AIChE, New York.
 - [64] Mitzushina, T., Ito, R. ve Miyashita, H., (1967). “Experimental Study of an Evaporative Cooler”, *International Chemical Engineering*, 7(4): 727–732.
 - [65] Mitzushina, T., Ito, R. ve Miyashita, H., (1968). “Characteristics and Methods of Thermal Design of Evaporative Cooler”, *International Chemical Engineering*, 8(3): 532–538.

- [66] Niitsu, Y., Naito, K. ve Anzai, T., (1967). "Studies on Characteristics and Design Procedure of Evaporative Coolers", Journal of SHASE, 43(7): 581–590.
- [67] Ala, H. ve Kai, S., (2002). "Theoretical and Computational Analysis of Closed Wet Cooling Towers and its Applications in Cooling of Buildings", Energy and Buildings, 34: 477-486.
- [68] Kays, W.M. ve Crawford, M.E., (1980). Convective Heat and Mass Transfer, Second Edition, McGraw-Hill, New York.
- [69] Hilpert, R., (1933). "Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren im Luftstrom", Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A, 4(5): 215-224.
- [70] Zhukauskas, A., (1972). "Heat Transfer from Tubes in Crossflow", Advances in Heat Transfer, 8: 93-160.
- [71] Churchill, S.W. ve Bernstein, M., (1977). "A Correlating Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow", Journal of Heat Transfer, 99: 300–306.
- [72] Fujita, Y. ve Tsutsui., M., (1998). "Experimental Investigation of Falling Film Evaporation on Horizontal Tubes", Heat Transfer-Japanese Research, 27: 609–618.
- [73] Sumer, B.M. ve Fredsøe, J., (2006). Hydrodynamics around Cylindrical Structures, 26, Revised Edition, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- [74] Arslan, G., (2012). "Kanatlı Borulu Isı Değiştiricilerinde İç Yüzeyi Yivli Boru Kullanımının Isı Geçişine Etkisi", Tesisat Mühendisliği, 132: 12–18.
- [75] Jähne, B., (2005). Digital Image Processing, Sixth Edition, Springer, Berlin.
- [76] Gonzalez, R. C. ve Woods, R. E., (2007). Digital Image Processing, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [77] Samtaş, G. ve Gülesin, M., (2011). "Sayısal Görüntü İşleme ve Farklı Alanlardaki Uygulamaları", Electronic Journal of Vocational Colleges, 2(1): 85-97.
- [78] Karakuş, D., (2006). Görüntü Analiz Yöntemleri ile Kayaçların Yapısal Özelliklerinin Tanımlanması, Doktora Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [79] Onat, M., (2008). Dijital Görüntü İşleme Yöntemleriyle Lifli Beton Numunelerindeki Çatlakların Tespit Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [80] Erbaş, K.S., (2011). "Sayısal Görüntü ve Sayısal Görüntü İşlemenin Tasarım Eğitimine Etkisi", 2nd International Conference on New Trends in Education and Their Implications, 27-29 Nisan 2011, Antalya, 231-237.
- [81] Kalaycı, T.E., Görüntü İşleme Raporu,
http://yzgrafik.ege.edu.tr/~tekrei/dosyalar/sunum/gi_r.pdf, 23 Mart 2011.

- [82] Kürekci, N.A., (2006). Soğutulan ve/veya Isıtılan Hacımlardaki Hız ve Sıcaklık Alanlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [83] Kline, S.J. ve McClintock., F.A., (1953). “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, Mechanical Engineering, 75: 3–8.
- [84] Akpınar, E.K., ve Biçer, Y., (2002). “Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Siklon Tipi Bir Kurutucunun Kullanılabilirliği”, Mühendis ve Makina Dergisi, 43(515): 21-26.
- [85] Midilli, A., (2001). Doğal Vakum Tekniği ile Atıksuların Damıtılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [86] Holman, J.P., (1971). Experimental Methods for Engineers, Second Edition, McGraw-Hill, New York.

MATLAB PROGRAMINDA KULLANILAN YAZILIMIN KODU

```
function varargout = clusterImg(imgin,Clusters,varargin)

% [IDX,C,sumd,D] = clusterImg(imgin,nClusters,inMask,labels)
%
% SYNTAX:
%
% [IDX,C,sumd,D] = clusterImg(imgin,nClusters,inMask,labels);
%
% *****
% INPUTS:
%
% Imgin:
%     an m x n x 3 (RGB) image
%
% Clusters:
%     Either A) an integer number of target clusters. (Note
%     that you will be prompted to click-define--using
%     IMPIXEL syntax--at least one pixel in each target
%     color cluster; you probably want this to be a
%     "reasonable" number (more than 1, less than, say,
%     20); or B) an nx3 array of predefined colors. Using
%     option B will skip the interactive selection process
%     and use the colors in Clusters as the bin targets.
%
% inMask
%     a binary mask of size m x n. If a mask is included, this function
%     will operate on a sub-image defined by IMCROP(imgin,BoundingBox),
%     where BoundingBox is the rectangular extent of the true mask.
%
% labels
%     a cell array of labels for the colormap display of the
%     segmented image. Note that the number of strings must
%     be equal to the number of colors.
%
% *****
```

```

% OUTPUTS:
%
% IDX, C, sumd, D
%     All as returned by KMEANS. Please refer to the help for that
%     function. Note, however, that the size of the outputs may be modified
%     by the inclusion of optional inMask input argument.
%
% clustered
%     an indexed image of size p x q x 1, segmented using kmeans
%     clustering. (See description of optional inMask input argument). If no
%     mask is provided, the CLUSTERED image is m x n x 1.
%
% clusteredMap
%     an Clusters x 3 matrix of RGB colors. These colors comprise the mean
%     values returned by each IMPIXEL selection when the user defines the
%     target cluster colors.
%
% clusterMask
%     a binary mask of size p x q x 1. Once the input has been
%     clustered, it will be displayed in a figure with a pushbutton prompt
%     to create a mask on a clustered color. If the button is pressed, the
%     user will be prompted to click-select a single cluster color (using
%     IMPIXEL syntax). CLUSTER_MASK will return a binary image with ones in
%     the location of the selected color, and zeros elsewhere.
%
% *****
% *****
% DEPENDENCIES:
% Image Processing Toolbox, Statistics Toolbox
% Copyright 2010 The MathWorks, Inc.
% *****
% *****

%Parse and initialize input and output arguments
if ndims(imgin)~=3
    error('Input image must be m x n x 3 (RGB)');
end
if nargin == 3
    inMask = varargin{1};
    if all(inMask(:))
        %NO OP: inMask is all 1's...no masking performed
        inMask = [];
    end
else
    inMask = [];
end

if ~isempty(inMask) %at least one excluded point; operate on masked sub-image
    [r,c]=find(inMask);

```



```

        bb = [min(c) min(r) max(c)-min(c) max(r)-min(r)];
        imgin = imcrop(imgin,bb);
        %bb = regionprops(bwlabel(inMask),'BoundingBox');
        %imgin = imcrop(imgin,bb.BoundingBox);
    end

    %Operate on image as double, regardless of input type
    if ~isa(imgin,'double')
        imgin = im2double(imgin);
    end

    %Get individual RGB colors included in segmentation
    % rc = imgin(:,:,1);
    % gc = imgin(:,:,2);
    % bc = imgin(:,:,3);
    tmpimg = imgin;
    segcolors = double([rc(:) gc(:) bc(:)]);

    tmpfig=figure('numbertitle','off','name','Cluster RGB Image','visible','off');
    imshow(tmpimg);
    set(tmpfig,'units','pixels','position',[0 0 1000 800]);
    centerfig(tmpfig);
    set(tmpfig,'visible','on');

    if numel(Clusters)==1
        % Prompt for target cluster colors
        colors = zeros(Clusters,3);
        for ii=1:Clusters
            figure(tmpfig);
            title(sprintf('Select sample pixel(s) in cluster %d of %d:',ii,Clusters));
            tmp = impixel;
            colors(ii,:) = mean(tmp,1);
        end
    elseif size(Clusters,2) == 3
        % User passed in the target colors; skip interactive
        % selection
        colors = Clusters;
        Clusters = size(colors,1);
    end

    title('Segmenting. Please wait.....');
    drawnow;
    %Operate on colors (and image) as doubles()
    colors = im2double(colors);

    % CALL KMEANS with appropriate output arguments.
    if nargin < 2
        Idx =
        kmeans(segcolors,Clusters,'distance','sqEuclidean','start',colors,'emptyaction','singleton');
    end

```

```

elseif nargout == 2
    [Idx,varargout{2}] = ...
        kmeans(segcolors,Clusters,'distance','sqEuclidean','start',colors,'emptyaction','singleton');
elseif nargout == 3
    [Idx, varargout{2}, varargout{3}] = ...
        kmeans(segcolors,Clusters,'distance','sqEuclidean','start',colors,'emptyaction','singleton');
elseif nargout == 4
    [Idx, varargout{2}, varargout{3}, varargout{4}] = ...
        kmeans(segcolors,Clusters,'distance','sqEuclidean','start',colors,'emptyaction','singleton');
else
    error('Inappropriate number of outputs requested in ClusterImg.');
```

```

end
if nargout >= 2
    varargout{1} = Idx;
end

pixel_labels = reshape(Idx,size(rc));
imshow(pixel_labels,[]);
title('Image labeled by cluster index');
set(tmpfig,'units','pixels','position',[0 0 1000 800]);
centerfig(tmpfig);

colormap(colors);
tmp = colorbar;
set(tmp,'ytick',1:Clusters);
if nargin == 4
    set(tmp,'yticklabel',varargin{2});
end

uicontrol('style','pushbutton','string','Export Clustered Image and Map to
Workspace','units','normalized',...
    'pos',[0.05 0.05 0.3 0.05],'callback',@exportMain);
uicontrol('style','pushbutton','string','Export Mask on Single Color','units','normalized',...
    'pos',[0.35 0.05 0.3 0.05],'callback',@exportClusterMask);
uicontrol('style','pushbutton','string','Export All Color Masks','units','normalized',...
    'pos',[0.65 0.05 0.3 0.05],'callback',{@exportAllClusterMasks,colors});

%Subfunctions local to clustering only.
function exportMain(varargin)
    n = 0; tmp = 1;
    while tmp
        n = n + 1;
        tmp = evalin('base',['exist(''clustered', num2str(n), '')']);
    end
    fprintf('Image written to clustered%d and associated colormap written to
clusteredMap%d\n',n,n);
    fprintf('Display with:    imshow(clustered%d,clusteredMap%d);\n',n,n);
    assignin('base',['clustered' num2str(n)],pixel_labels);
    assignin('base',['clusteredMap' num2str(n)],colors);
end

```

```

function exportClusterMask(varargin)
    title('Click on any pixel in the desired region.');
```

p=impixel;

```

    if ~all(p(:)==p(1))
        beep;
        disp('Select a SINGLE region!!!');
    else
        n = 0; tmp = 1;
        while tmp
            n = n + 1;
            tmp = evalin('base', ['exist(''clusterMask'', num2str(n), '')']);
        end
        title('Image labeled by cluster index');
        fprintf('Mask of region %d written to clusterMask%d\n', p(1), n);
        assignin('base', ['clusterMask' num2str(n)], pixel_labels==p(1));
    end
end

function exportAllClusterMasks(varargin)
    colors = varargin{3};
    n = 0; tmp = 1;
    while tmp
        n = n + 1;
        tmp = evalin('base', ['exist(''clusterMask'', num2str(n), '')']);
    end
    for ii = 1:size(colors,1)
        fprintf('Mask of region %d written to clusterMask%d\n', ii, n+ii-1);
        assignin('base', ['clusterMask' num2str(n+ii-1)], pixel_labels==ii);
    end
end

end

clear
clc
D4edited1 = imread('D4_edited-1.jpg');
clusterImg(D4edited1, 10)

[size_x, size_y] = size(clusterMask1)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
    for j = 1:1:size_y
        if clusterMask1(i,j) == 1
            variable1 = variable1 + 1
        else
            variable2 = variable2 + 1
        end
    end
end

```

```

end
end
end

result1 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask2)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask2(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result2 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask3)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask3(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result3 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask4)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask4(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result4 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask5)

```

```

variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask5(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result5 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask6)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask6(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result6 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask7)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask7(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result7 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask8)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask8(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1

```

```

else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end

result8 = variable1 / (variable1 + variable2)

[size_x, size_y] = size(clusterMask9)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask9(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result9 = variable1 / (variable1 + variable2)

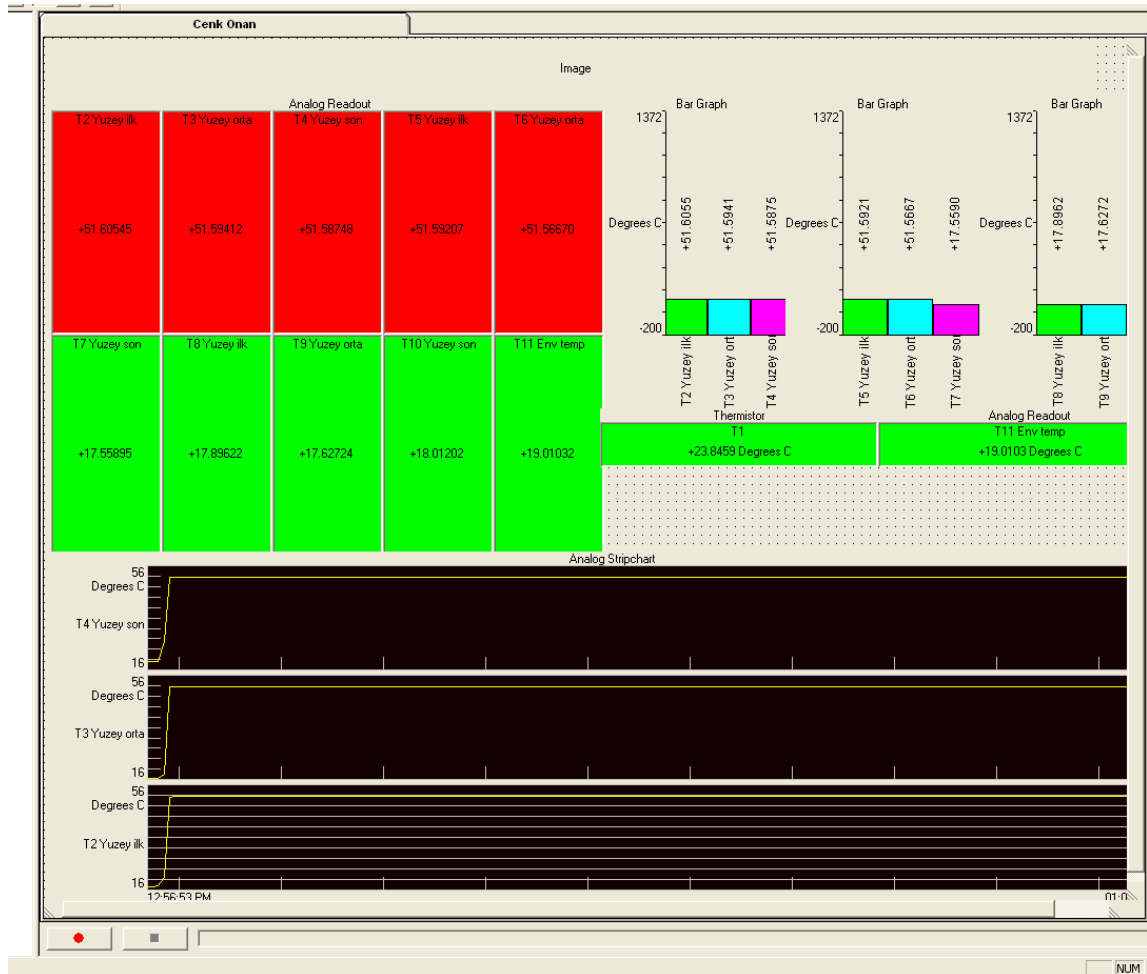
[size_x, size_y] = size(clusterMask10)
variable1 = 0
variable2 = 0
for i = 1:1:size_x
for j = 1:1:size_y
if clusterMask10(i,j) == 1
variable1 = variable1 + 1
else
variable2 = variable2 + 1
end
end
end
result10 = variable1 / (variable1 + variable2)

total = result1+result2+result3+result4+result5+result6+result7+result8+result9+result10

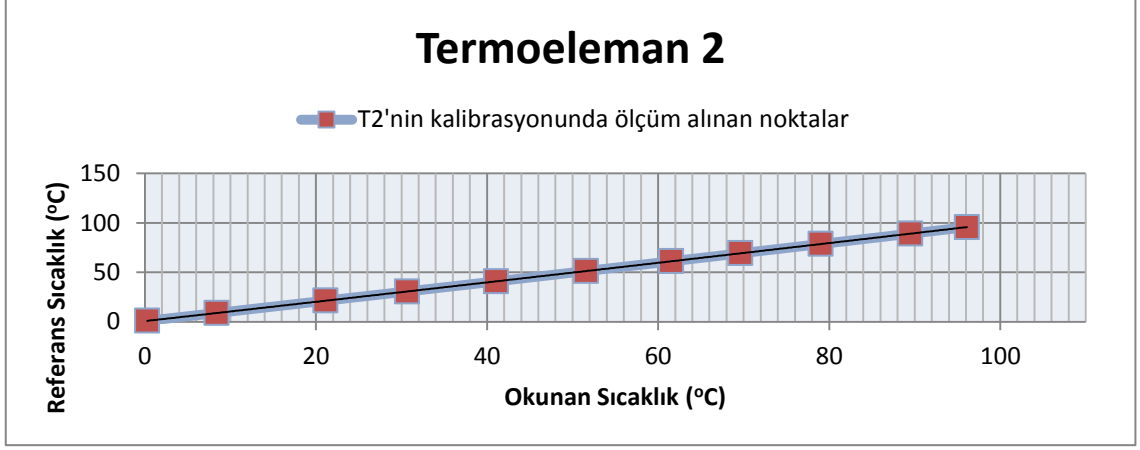
```

KALİBRASYON EĞRİLERİ

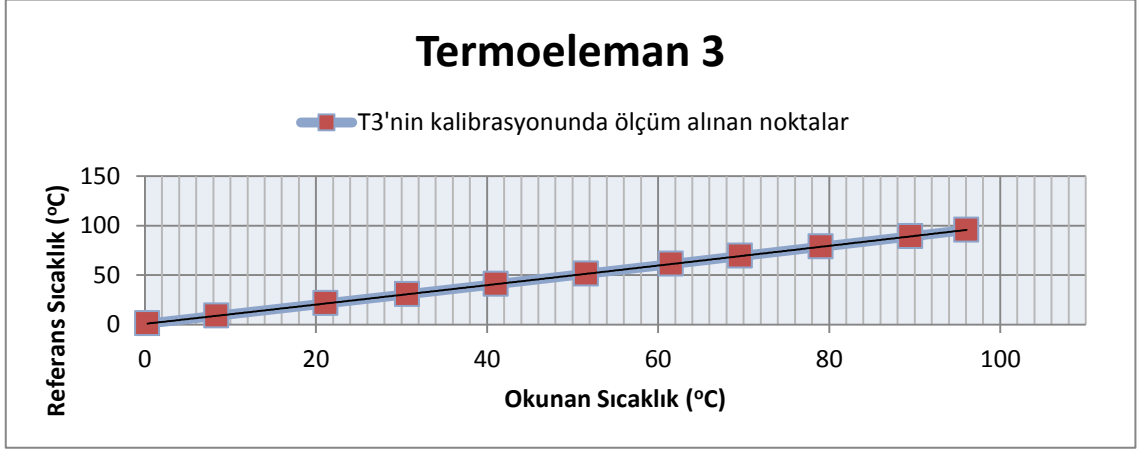
Deney setinde kullanılan termoelemanların kalibrasyon eğrileri belirlenmiştir. Veri kaydedici içerisine tanımlanan arayüz ile kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak kalibrasyon programında T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9 ve T10 termoelemanlarının sıcaklık değerlerinin ölçülmesi ve zamana bağlı sıcaklık değişiminin grafiği aşağıdaki gibidir.



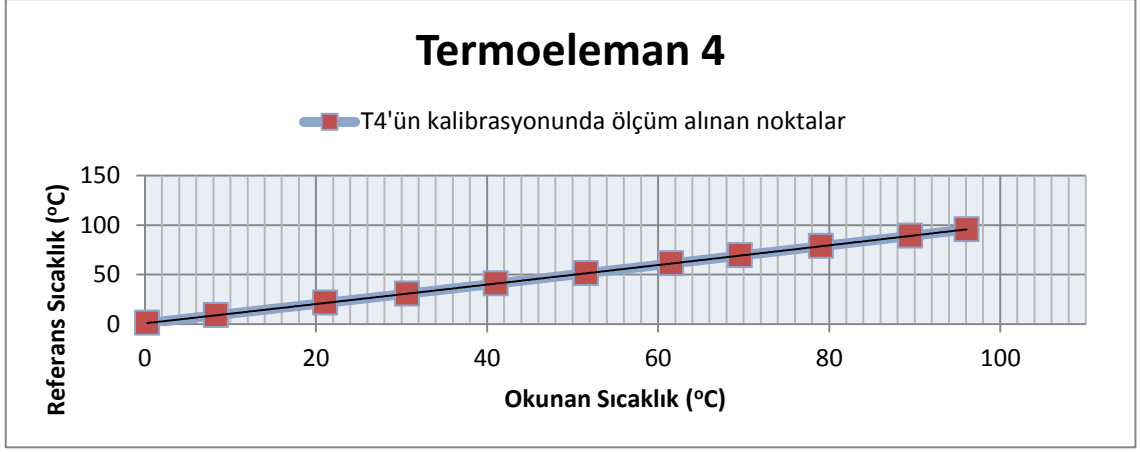
Öncelikle T2 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = -2E-07x^3 + 0.0002x^2 + 0.9704x + 0.6437$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



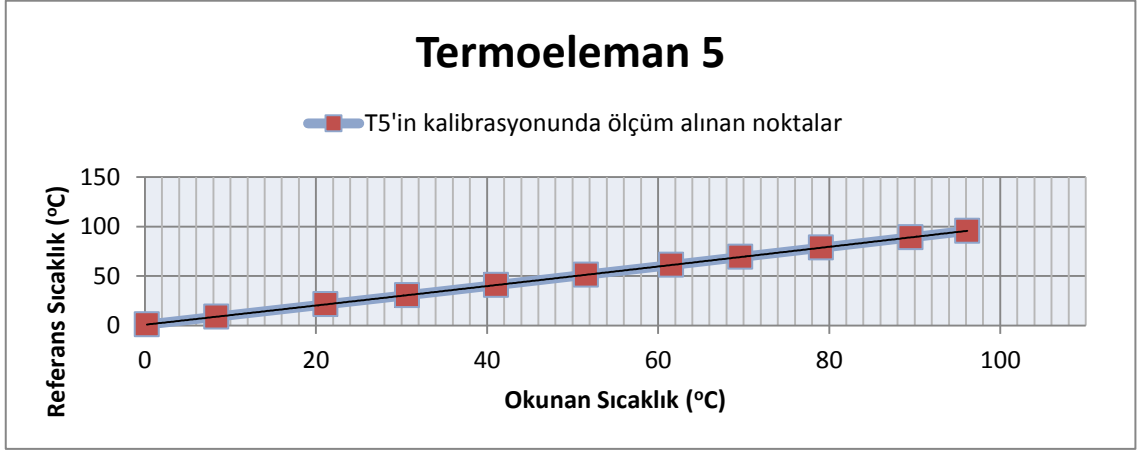
T3 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = -9E-08x^3 + 0.0002x^2 + 0.9712x + 0.6378$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



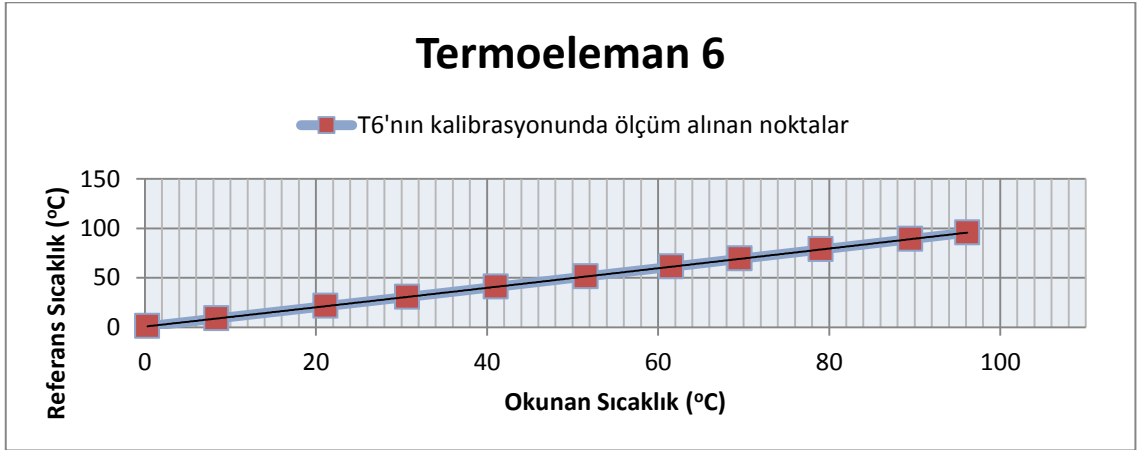
T4 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = 3E-07x^3 + 0.0001x^2 + 0.9733x + 0.6502$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



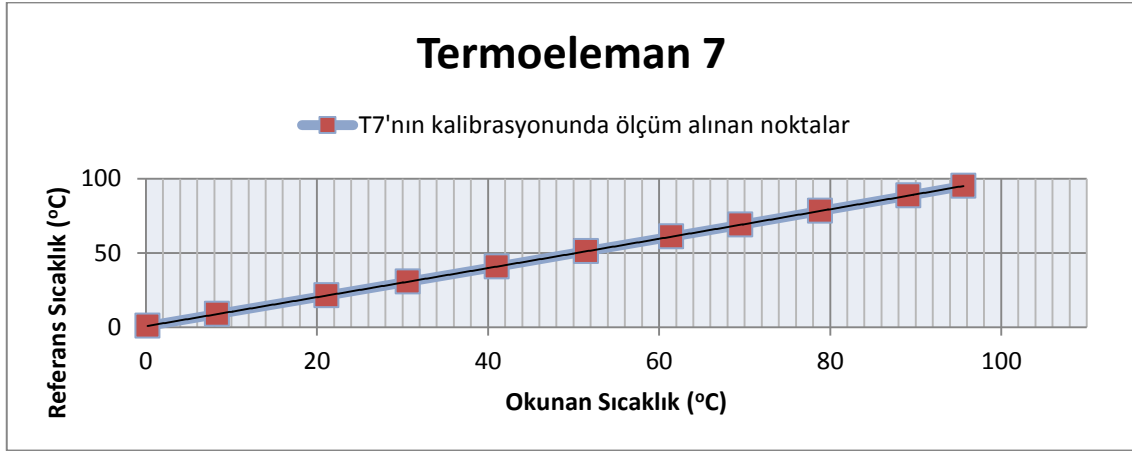
T5 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = -4E-07x^3 + 0.0002x^2 + 0.9686x + 0.6887$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



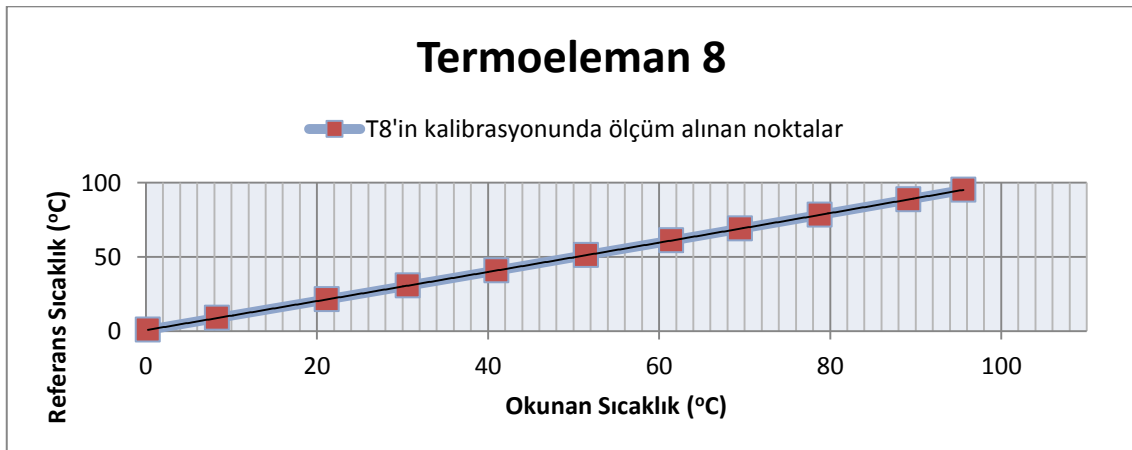
T6 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = -4E-07x^3 + 0.0002x^2 + 0.9714x + 0.6366$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



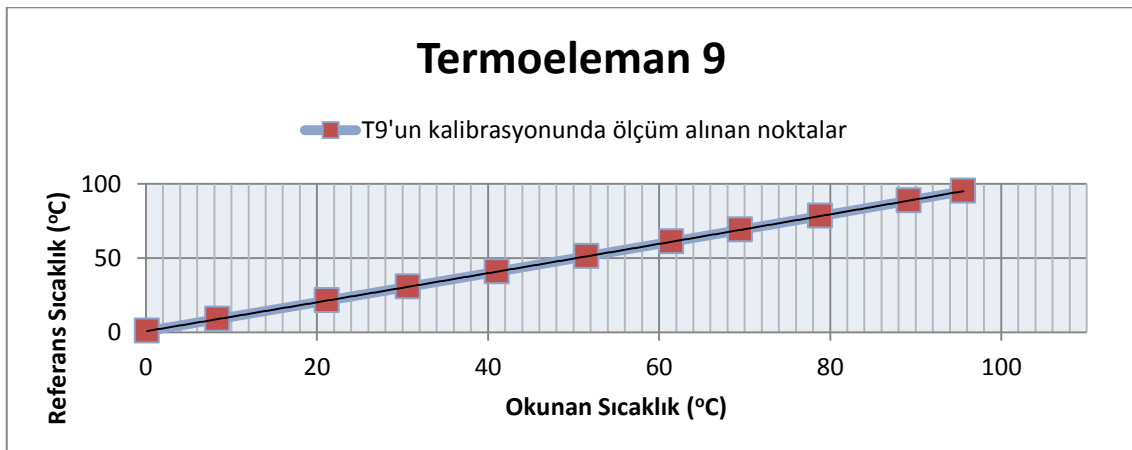
T7 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = 1E-06x^3 - 3E-05x^2 + 0.9789x + 0.6177$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



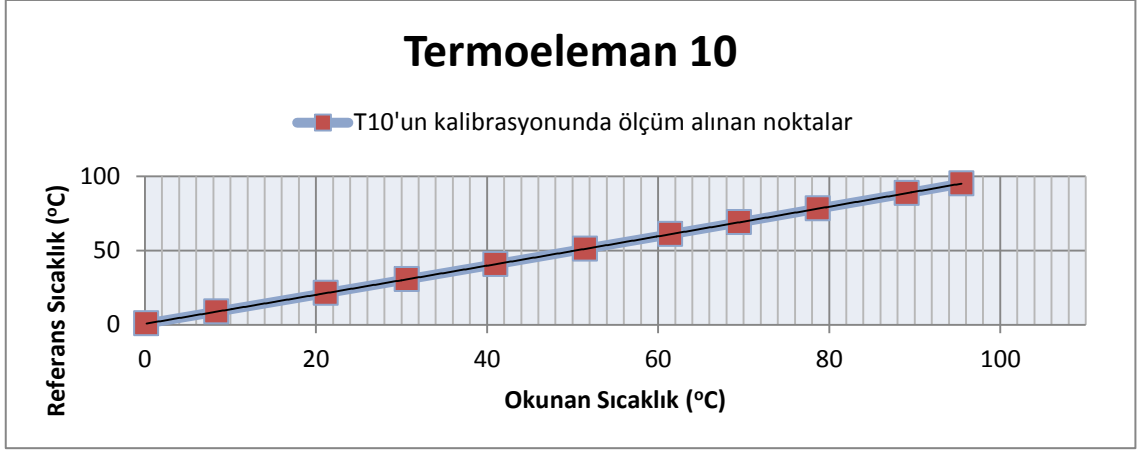
T8 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = 1E-06x^3 + 1E-05x^2 + 0.9788x + 0.5835$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.



T9 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = 7E-07x^3 + 9E-05x^2 + 0.9738x + 0.664$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.

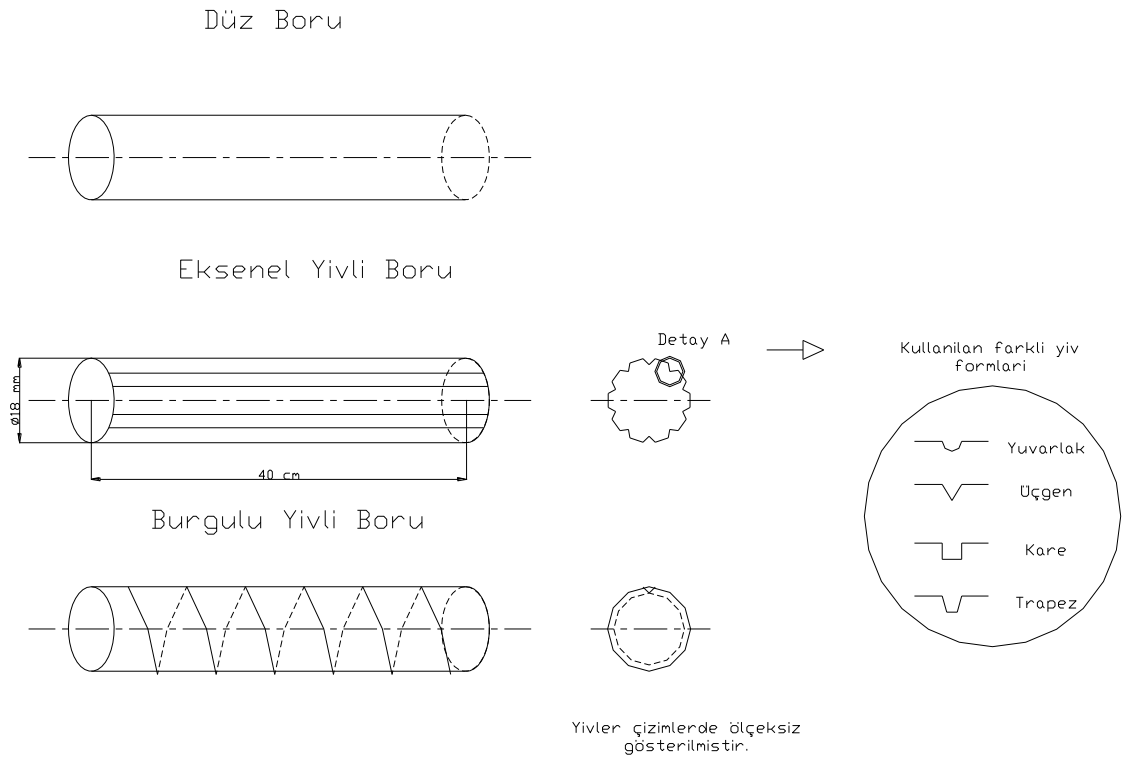


T10 nolu termoelemanın kalibrasyon denklemi $y = 1E-06x^3 + 5E-05x^2 + 0.9763x + 0.6193$ olarak bulunmuştur ve regresyon denkleminin belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 1'dir.

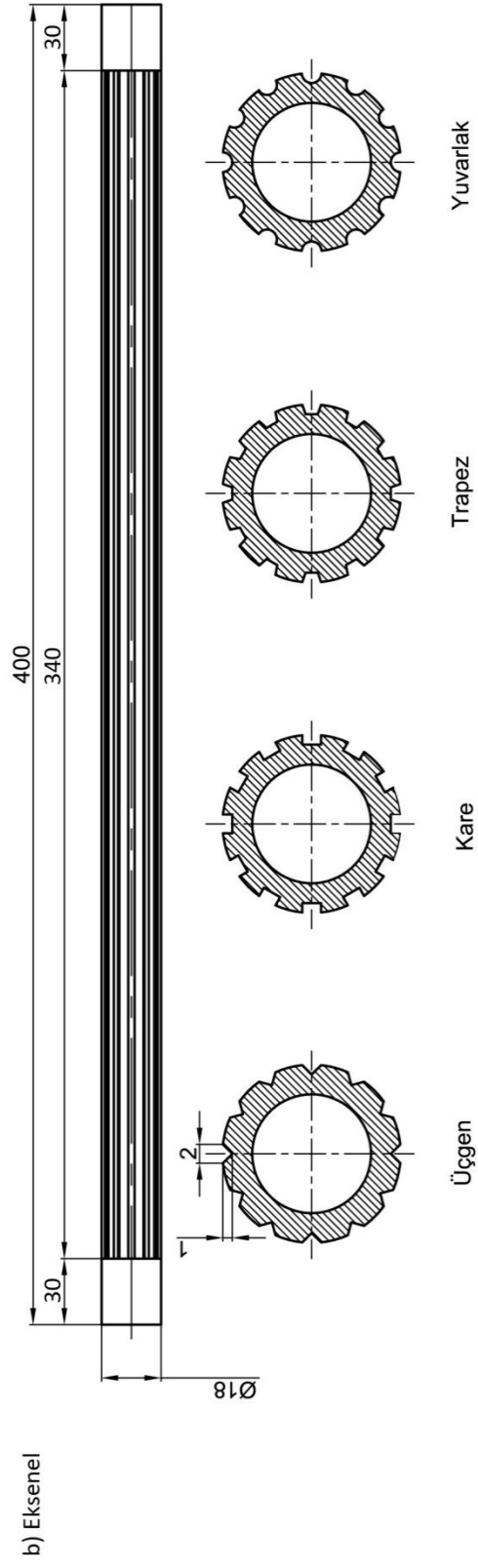
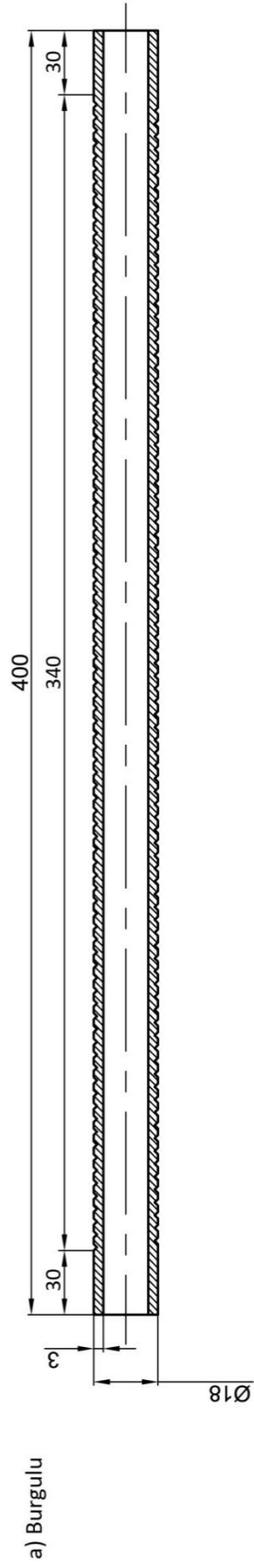


DENEY TESİSATININ TEKNİK DETAYLARI

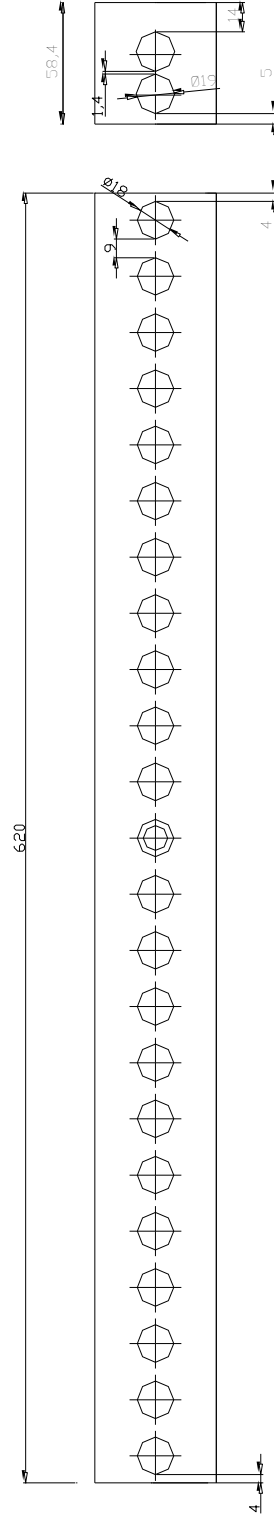
Görüntü işleme ile ıslak yüzey alanı belirlenen yiv geometrilerinin teknik detayları aşağıdaki şekilde gibidir. Yivler hem eksenel olarak hemde burgulu olarak yüzeyi düz 18 mm çapında 3 mm cidar kalınlığındaki boruların üzerindedir.



Şematik olarak gösterilen yivli boruların teknik detayları şekilde gösterildiği gibidir. 4 farklı tipte (üçgen, trapez, kare ve yuvarlak) yiv boru dış yüzeyine eksenel ve burgulu olmak üzere açılmıştır.



Deney tesisatında kullanılan kestamid kaidelerin boyutlandırması aşağıdaki şekilde gibidir.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cenk ONAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.11.1983 İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : conan@yildiz.edu.tr, onancenk@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lise	Sayısal (FM)	Kadıköy Osmangazi Anadolu Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Özkan D.B., Onan C., Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey, *Applied Energy*, 88, 4, p. 1331-1342, (2011).
2. Onan C., Özkan D.B., Erdem S., Exergy analysis of a solar assisted absorption cooling system on an hourly basis in villa applications, *Energy*, 35, 12, p. 5277-5285, (2010).
3. Özkan D.B., Onan C., Erdem S., Yalıtım Malzemesi Kalınlığının Isı Yalıtımına Etkisi, *Sigma*, 2009-3, p. 190-196, (2009).
4. Onan C., Özkan D.B., Güneş Enerjisi Destekli Soğutma Sistemleri ve Örnek Projenin Diğer Uygulamalarla Karşılaştırılması, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 13, p. 11-19, (2009).
5. Onan C., Erdem S., TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardındaki Değişikliklerin Analizi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 109, p. 49-52, (2009).
6. Özkan D.B., Onan C., Tural, M., Erdem, S., Yapılarda Yalıtım Uygulamasının Ekonomik Analizi, *İzolasyon Dünyası*, 66, p. 55-59, (2007).

Bildiri

1. Onan C., Özkan D.B., Ceren L., Heat Transfer Analysis of Internally Grooved Copper Tube R404-A Evaporators, *Asme Imece2012*, Houston, USA, p. 1-5, (2012).
2. Erdem S., Onan C., Özkan D.B., Bedirli E., The Effect of Insulation on Energy Savings and Costs for the Current Building Inventory in Turkey, *Asme Imece2012*, Houston, USA, p. 1-9, (2012).
3. Onan C., Özkan D.B., Daily Exergy Assesment of LiBr-Water Absorption Chiller Used for Solar Cooling, *Asme ES2010*, Phoenix, USA, p. 869-878, (2010).
4. Erdem S., Özkan D.B., Onan C., Economic Analysis of Solar Assisted Ground Source Heat Pump System in Heating and Cooling a Villa in Mardin, *Humboldt Kolleg Istanbul*, Turkey, p. 1-7, (2010).

5. Özkan D.B., Onan C., Ağra Ö. , Coefficient of Performance Study on R600a, R134a, R290, R407c, R410a, R32 as an Alternative Refrigerant to R22, CLIMA2010, Antalya, Turkey, p. 1-6, (2010).
6. Özkan D.B., Onan C., A New Approach to Determine Optimum Insulation Thickness for All Buildings In Turkey According to Heating Loads And Heat Gains, Asme ES2010, Phoenix, USA, p. 331-338, (2010).
7. Onan C., Özkan D.B., Erdem S., Economic Analysis of Solar Assisted Absorption Cooling Systems in Climatization of the Villas”, 46th International Congress AICARR, Milano, Italy, p. 335-350, (2008).
8. Erdem S., Özkan D.B., Onan C. , Economic Analysis of Solar Assisted Ground Source Heat Pump System by Comparing Conventional System in Heating and Cooling a Villa, 46th International Congress AICARR, Milano, Italy, p. 319-333, (2008).

Proje

1. “01303.STZ.2012-1” nolu San-Tez Projesi, Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinde Alternatif Soğutkanların Performansa Etkisinin Sayısal ve Deneysel İncelemesi, Yardımcı Personel.

ÖDÜLLERİ

1. İzocam Yalıtım Yarışması ekip olarak 2.’lik ödülü, 2005.
2. Tübitak Bilimsel Yayınları Teşvik Ödülü, 2010.
3. Tübitak Bilimsel Yayınları Teşvik Ödülü, 2011.
4. TFSF 2012/63 fotoğraf yarışması eşdeğer ödülü, 2012.